

中国仿真科学与技术书系 “十一五”国家重点图书出版规划



SIMULATION SCIENCE

现代战术通信系统仿真设计

Simulation Design of Modern Tactic Communication System

何明利 范喜全 姜永广 等著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划
中国仿真科学与技术书系

现代战术通信系统仿真设计

Simulation Design of Modern Tactic Communication System

何明利 范喜全 姜永广 等著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书围绕现代战术通信系统仿真的技术开发和应用,将仿真技术的运用与战术通信系统的设计和工程建设实践相结合,研究了国内外相关技术发展现状和技术动态,比较全面地阐述了以数字化、网络化为特征的现代战术通信系统仿真的基本原理和方法,重点针对分布式仿真技术、半实物仿真技术、仿真建模技术、仿真模型可信度分析技术、仿真评估技术、仿真试验技术在战术通信系统中的应用进行了深入研究和探索,并结合战术通信网络仿真系统建设的工程实践经验,给出了一个战术通信分布式半实物仿真系统具体实现和应用的典型范例,最后展望了战术通信系统仿真技术的发展和研究方向。

本书面向军事通信网络专业和网络仿真专业领域的学术研究和工程技术人员。所涉及的主要技术内容反映了作者团队数年来研究成果,全书采用理论与实践相结合的写法,由浅入深,内容全面,技术新颖,主要结论和做法可作为军事通信网络系统工程建设人员开展同类系统建设的直接参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代战术通信系统仿真设计 / 何明利等著. —北京: 电子工业出版社, 2011. 5

ISBN 978-7-121-13553-8

(中国仿真科学与技术书系)

I. ①现… II. ①何… III. ①战术—军用通信—系统仿真 IV. ①E96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 087156 号

责任编辑: 竺南直

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19 字数: 486 千字

印 次: 2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3 500 册 定价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

信息通信技术的发展加快了战术通信系统的更新速度。随着地面、空中、太空各种通信装备的不断出现,战术通信系统的概念、范围、手段等发生了巨大的变化。由于战术通信系统日趋复杂、规模日趋庞大,使战术通信系统的研制变得越来越复杂。传统的经验、试验测试及数学推导等方法难以满足需求,必须采用系统工程的方法。随着科学技术的飞速发展,建模与仿真技术已日渐发展成为独立于理论研究、实验与试验研究的一种基本科学活动。建模与仿真技术以其灵活、可控、经济、快速高效等特点成为通信系统研制开发及系统检验与评估的一种有效手段,成为开发研制大型军事通信系统和复杂武器装备的重要工具。

需求牵引、技术推动和经济支撑,使得仿真技术渗透于我军战术通信系统的规划、设计、研制、应用及训练等各个阶段。但是,无论从广度上还是深度上,我军战术通信仿真的研究与发达国家相比还有相当大的差距。从满足战术通信系统概念论证、战术技术指标确定、系统研制到部队使用全寿命周期需要的角度出发,建立先进、高效的大型战术通信仿真试验环境是十分必要的,也是非常具有挑战性的。

本书是作者在总结多年的军事通信系统科研建设和仿真开发工作经验与成果的基础上,吸取国内外相关论著的精华编写而成。本书将飞速发展的战术通信系统与仿真技术相结合,立足于科技前沿,面向战术通信系统建设的军事需求,对战术通信仿真相关技术进行深入的研究和探讨,对战术通信仿真试验环境的建设和应用等实现技术和设计方法进行系统的剖析,力求深入浅出、易学易用,希望有助于广大读者的学习和工作。最后针对战术通信仿真给出了比较完整的设计实例,这些实例是我们科研工作的总结,通过这些实例,希望能够起到抛砖引玉的作用。

本书共分 10 章。第 1 章首先介绍战术通信系统概念、特点及其发展现状,然后对仿真技术及其发展状况做了简要的描述;并就战术通信仿真的军事需求和仿真技术在战术通信系统中的应用情况做了分析;最后对已有的信道仿真、网络仿真、系统仿真等各类仿真工具做了介绍和总结。第 2 章就国外(以美军为主)的先进大型军用仿真系统的组成结构、应用状况进行了分析,介绍了国外仿真技术的发展方向和建设方法。在第 3~7 章,主要就战术通信仿真中的主要关键技术和方法进行了深入的剖析,其中第 3 章对分布式半实物仿真的概念、体系架构和关键技术等进行了介绍;第 4 章针对战术通信系统的主要要素,描述了其仿真建模基本方法以及协议模型、节点模型的结构组成;第 5 章就战术通信系统可信性的基本问题、基本概念进行了描述,介绍了战术通信仿真可信性保证的工程实施方法,包括人员组织安排、执行过程、形成的工作文档等内容;第 6 章就战术通信系统中的效能评估体系架构进行了描述,并对如何进行指标选取、如何建立指标体系、如何构建评估模型等问题进行了介绍;第 7 章概括了一些当前常用的仿真试验设计一般方法,结合战术通信分布式半实物仿真的试验特点,论述了试验设计在战术通信仿真中的应用。第 8 章在前面几章介绍的仿真技术和方法的基础上,结合作者多年的工程实践经验,给出了一个战术通信仿真环境的构建实例,包括仿真试验环境的体系架构、结构组成、子系统的功能划分、仿真运行流程等内容。第 9 章对战术通信仿真在系统全生命周期中的应用做了介绍,并就仿真如何应用于战术通信系统设计

进行详细分析。最后在第 10 章中分析了战术通信仿真未来的发展方向。

本书是作者团队数十年研究工作的结晶，何明利、范喜全、谭齐、田永春、姜永广、韦涛、莫娴、张建军、王中武、吴茜、杨华、曾杰等参与了编著。何明利、范喜全负责全书的整体统筹，田永春和谭齐负责统稿校改，第 1、10 章由何明利、范喜全、姜永广、王中武等负责编写；第 2 章由何明利、曾杰、谭齐等负责编写；第 3 章由田永春、吴茜等负责编写；第 4 章由范喜全、田永春、谭齐、莫娴等负责编写；第 5 章由谭齐、莫娴、杨华负责编写；第 6 章由韦涛、谭齐等负责编写；第 7 章由谭齐、杨华、莫娴负责编写；第 8、9 章由范喜全、田永春、张建军、谭齐、韦涛等负责编写。李振邦研究员、曾浩洋研究员等阅读了本书并提出了宝贵的修改意见，赖增桂、阳洋参与了部分章节的校稿，这里一并向他们表示感谢。本书的撰写和出版得到北京特种车辆研究所的大力支持和帮助，特此致谢。

战术通信仿真所涉及的学科内容较多，是一个较新的研究领域，而且发展很快，加之我们的理论水平和研究深度的局限性，书中疏漏之处在所难免，欢迎读者批评指正，恳请读者对本书提出宝贵的意见和建议，以便以后不断改进。

何明利

2011 年 4 月于北京

序

信息化是军队现代化建设的重点，而军事通信则是信息化的基础。与机械化战争时代相比，信息化时代的军事通信技术及其支持下的军事通信系统有着突出时代特征。特别是在战术通信领域，将传统的模拟有线通信和电台点对点话音通信模式，转变为由各种数字电台、卫星通信终端、数据链、网关设备和网管系统等组成的互联网络，形成数据、话音、图像等信息高速无缝传输能力，为作战部队在高速机动中，动中通、扰中通、抗中通，提供可靠保证，是世界各国争相夺取的现代军事通信制高点。

以数字化和网络化技术为基础的现代战术通信系统，综合集成了软件无线电、认知无线电、光通信、卫星通信、移动无线通信、IP 网络等高新技术，其设计显然不是简单的技术堆砌，一方面要按照相应技术领域的发展情况，有预见性的择优选择单体技术实现途径，如信源信道编解码、抗干扰、数字化射频等，另一方面，则要按照战术指挥信息传输要求和标准化要求，统一设计系统体系结构，优化设计包括智能寻址、数话同传、网络管理、网络安全等在内的系统综合集成方案，以确保系统功能性能达到最优。这无疑是一项复杂、艰巨的工作。

从 20 世纪 90 年代起，发达国家以数字化部队建设为目标，在军事技术领先思想的指导下，以安全网络体系结构设计、多波形多波段终端、集成方案优化设计、通信链路抗干扰高速数据传输等为重点，显著加快了现代战术通信系统的建设步伐。针对战术通信网络节点数量大、传输链路易受地形地物影响、数字化通信设备编配应用缺乏经验、干扰与抗干扰对抗激烈等系统建设难题，主要采用了构建开放式原型网络系统，开展系统半实物仿真设计的新型设计方法，力求为系统原理分析、技术可行性验证、系统制造、系统应用和持续完善提供全过程、全寿命支持。

本书作者和团队长期从事现代战术通信系统的研制工作，其研究成果曾获得多项国家、军队科技进步奖励。凝聚其十几年的设计经验和成果而成的本书出版，对推动现代战术通信系统设计方法自主创新，具有积极推动作用。

是为序。

中国工程院院士

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 战术通信系统	1
1.1.1 战术通信系统概念	1
1.1.2 战术通信系统特点	2
1.1.3 外军战术通信系统发展状况	4
1.2 仿真技术及发展	7
1.2.1 仿真技术发展概况	7
1.2.2 网络仿真技术发展	8
1.3 战术通信仿真	9
1.3.1 战术通信仿真需求	9
1.3.2 仿真技术在战术通信领域的应用现状	12
1.4 主要仿真工具介绍	13
1.4.1 信道仿真工具	13
1.4.2 网络仿真工具	17
1.4.3 系统仿真工具	20
第 2 章 国外战术通信仿真系统	23
2.1 概述	23
2.2 JCSS 系统	24
2.2.1 JCSS 系统概述	24
2.2.2 JCSS 系统体系结构	24
2.2.3 JCSS 模型结构与设计	28
2.2.4 JCSS 信息交互流程	30
2.2.5 JCSS 系统应用	31
2.3 JMASS 系统	32
2.3.1 JMASS 背景与发展	33
2.3.2 JMASS 系统的设计目标	33
2.3.3 JMASS 系统的主要特点	35
2.3.4 JMASS 系统的组成	37
2.3.5 JMASS 的体系结构和模型	37
2.3.6 JMASS 通过 HLA 实现互操作	42
2.4 JWARS 系统	43
2.4.1 JWARS 系统概况	43
2.4.2 JWARS 系统设计和构件	44
2.4.3 JWARS 问题域	44

2.4.4 JWARS 仿真域	46
2.4.5 JWARS 平台域	47
2.5 STOW 系统	47
2.5.1 STOW 系统研制背景	47
2.5.2 STOW 仿真系统构想与能力	48
2.5.3 STOW 仿真系统演习和应用	51
2.6 发展趋势	52
第 3 章 分布式半实物仿真技术与方法	55
3.1 概述	55
3.1.1 半实物仿真技术	56
3.1.2 分布式仿真技术	57
3.2 分布式半实物仿真体系结构	61
3.2.1 体系结构	62
3.2.2 信息流程	64
3.2.3 典型配置方法	69
3.3 分布式半实物仿真的关键技术	70
3.3.1 包截获与包转换技术	70
3.3.2 隧道模拟技术	71
3.3.3 HLA 接口设计	74
3.3.4 时间管理策略设计	78
第 4 章 战术通信仿真模型构建技术	82
4.1 仿真建模方法	82
4.1.1 建模基本途径	82
4.1.2 模型结构	86
4.1.3 模型关系	90
4.2 协议模型	92
4.2.1 物理信道模型	92
4.2.2 数据链路模型	101
4.2.3 网络交换模型	110
4.2.4 业务仿真建模	117
4.3 节点模型	121
4.3.1 模型结构	122
4.3.2 节点关系模型	126
4.4 模型应用	135
第 5 章 战术通信仿真可信性保证技术	138
5.1 基本概念	138
5.1.1 VV&A 的概念	138
5.1.2 仿真逼真度	139

5.1.3	仿真可信度	139
5.2	基本原则	139
5.3	可信性保证技术和方法	141
5.3.1	校核与验证技术	141
5.3.2	仿真系统输出统计分析方法	143
5.3.3	可信度评估方法	148
5.4	战术通信仿真可信性保证的工程方法	154
5.4.1	人员组织安排	154
5.4.2	执行过程	155
5.4.3	形成文档	161
第 6 章	战术通信效能评估技术	168
6.1	基本概念	168
6.1.1	一般术语	168
6.1.2	系统效能	169
6.1.3	评估要素	170
6.2	评估指标体系	171
6.2.1	指标选取原则	171
6.2.2	指标选取方法	172
6.2.3	指标体系设计原则	172
6.2.4	评估指标体系建立	173
6.3	评估模型	178
6.3.1	指标处理	178
6.3.2	指标量化	180
6.3.3	评估算法	182
6.4	战术通信评估体系架构	185
第 7 章	战术通信仿真试验方法	187
7.1	基本概念	187
7.2	试验设计方法研究	189
7.3	战术通信仿真试验设计的特点	193
7.4	战术通信仿真试验设计方法的选择	194
7.5	战术通信仿真试验设计过程	195
7.6	战术通信仿真试验与评估联合设计	196
第 8 章	战术通信仿真环境构建实例	198
8.1	仿真实验环境设计	199
8.1.1	应用目标	199
8.1.2	系统体系结构	199
8.1.3	系统组成	201
8.1.4	工具选择与配置	203

8.2	战术通信分布式半实物仿真设计	205
8.2.1	系统的结构与组成	205
8.2.2	仿真想定与主控	208
8.2.3	网络仿真	216
8.2.4	仿真数据库	222
8.2.5	效能评估	227
8.2.6	半实物接口网关	231
8.3	网络仿真模型	244
8.3.1	建模内容	244
8.3.2	模型体系	246
8.3.3	模型的组织应用	247
8.3.4	模型设计	248
8.4	仿真环境运行与控制	271
8.4.1	仿真规划管理	271
8.4.2	仿真数据交互	271
8.4.3	仿真结果统计	272
8.4.4	仿真运行流程	274
第 9 章	战术通信仿真环境的应用	277
9.1	主要应用方向	277
9.1.1	开发、测量、压力测试	278
9.1.2	互操作测试	278
9.1.3	模型有效性测试	279
9.1.4	接入实物系统, 支持系统联试	279
9.1.5	与网管结合	280
9.1.6	模拟训练系统开发与部队的演习	280
9.1.7	仿真技术开发	280
9.2	仿真在战术通信系统设计中的典型应用	281
9.2.1	基于仿真的网络设计应用	283
9.2.2	网络关键技术的仿真应用	283
9.2.3	网络性能指标的仿真验证应用	285
9.2.4	基于网络仿真的系统优化应用	285
第 10 章	战术通信仿真技术的发展与展望	287
参考文献		292

第1章 绪 论

军事通信是为战争服务的，是作战指挥的基本手段，也是决定战争胜负的重要因素之一。随着信息技术的发展和武器装备的进步，战争形态、作战样式正在发生深刻的变化，而通信的地位和作用也越来越重要。

从应用领域角度，可以将通信分为民用通信领域和军事通信领域。军事通信领域又分为战略通信、战役通信和战术通信。本章从战术通信系统的基本概念和特点入手，分析了仿真技术在战术通信系统发展过程中的作用和基本需求，并对战术通信使用的主要仿真工具进行了介绍。

1.1 战术通信系统

1.1.1 战术通信系统概念

军事通信是伴随武装冲突出现而产生的，随着电子技术渗透到各武器系统并广泛地运用于战场的各个领域，其地位与作用在现代战争中的越来越突出。按照通信保障的范围分类，军事通信分为战略通信、战役通信和战术通信。

战术通信系统是军事信息系统网的重要组成部分。根据常规的分类，战术通信系统是指为保障战斗指挥、在战斗地区内建立的通信系统，按战斗规模，分为师（旅）、团、营战术通信网和相应规模的军兵种部队战术通信网。它主要是以野战通信装备为基本通信手段，并利用战斗地区既有通信设施，由无线电台、有线通信、无线接力通信和野战光纤通信设备等组成。战术通信系统必须为整个作战空间提供战场和共享态势感知的公共通信能力；特别是必须在整个作战空间提供鲁棒的话音、数据通信能力以及与上级战略信息资源的连通性。

外军从 20 世纪 90 年代的“数字化部队”到近年来的新型“信息化部队”的建设中，战术通信技术获得了迅猛发展。代表最新通信技术水平的研究计划层出不穷。以美军为例，陆、海、空三军正在围绕网络中心战的作战思想开发新型战役战术信息系统，着重解决系统的互连互通、“动中通”、信息安全和抗毁能力的问题，实现大容量的多媒体综合业务。其中核心工作是开发面向未来的新的 C4ISR 体系结构。新的体系结构具有下列几个特点：

- 大大促进军用通信系统的横向整合，通信网络的互连互通互操作性增强；
- 数据通信将成为主要业务；
- 通信容量巨增，数据速率自适应可变；
- 卫星通信在军事通信中的作用逐步加强；
- 抗毁及多级安全保密能力提高，能实现加密后的互通。

1.1.2 战术通信系统特点

战术通信系统是在野战环境下适应战术应用的通信系统，因其执行任务、运行环境的特殊性，与其他军用和民用通信系统相比较有其自身独特的特点，并为战术通信系统的设计带来了诸多困难，主要表现在：

(1) 一体化综合性网络

战术通信系统是一个集指挥、控制、通信与计算机于一体的综合网络，为系统提供灵活、安全、无缝连接的综合业务服务，支持横向和纵向的互连互通，具有抗毁顽存能力，为各级指挥员和作战单元提供及时准确的战场态势，满足高机动条件下战场指挥控制要求。

为满足上述的要求，战术通信系统必须能够利用包括有线、战术电台、微波、卫星、空中通信平台等多种通信手段，搭建多层次通信网络；根据不同作战任务和作战样式，综合运用多种通信手段，灵活组织多种通信网络，为各级指挥员和作战单元提供通信能力和指挥保障。同时，战术通信系统还必须实现与不同兵种通信网络、战略/战役通信网之间的互连互通，实现一体化通信，构建统一的通信平台。

(2) 承载业务特殊性

战术通信系统中传递的信息主要包括话音、应用层业务数据、网络管理数据以及各层网络协议产生的信息（如路由通告等）。其中，业务数据按照内容划分主要包括态势感知信息、指挥控制信息、战场环境信息，目前这些信息表现形式主要是文本、文件和短报文，未来随着战术通信技术的发展还将包括更多的图像、视频等多媒体综合信息。根据信息的产生特点，业务数据又可分为周期性业务和突发性业务。其中，周期性业务主要是指一部分态势感知信息，如我军/友军位置信息等，这些信息具有一定的时间敏感性，需要定时传输并且业务的大小变化不大；突发性业务主要是指指挥控制信息和情报等，这些业务的产生具有一定的随机性，同时对传输的及时性和可靠性要求较高。

业务的特殊性造成了战术通信系统业务建模的难度，不同的业务其传输范围、传输的性能要求等是不一样的，它影响网络的拓扑结构、网络各层对业务的服务要求，从而影响战术通信系统的网络模型 $G(N, E)$ 与约束条件 Ru ，并与网络节点的队列排队模型、路由选择方式以及 MAC 方式等都有关系。例如为了满足某些紧急业务的传输要求，可能需要它具有很高的优先级，同时需要网络建立专网来保障它的传输。

(3) 网络节点的移动性

作战部队要求对变化的任务快速反应、快速部署,要求战术通信系统通过无线方式建立可靠的运动通信连接即要求动中通,需要时可建立新的移动 Ad hoc 网络以适应各种战术应用,而且要求有能够移动的骨干网结构,战术通信的基础结构应随着作战部队一起移动,要求能够和前沿的武器平台、单兵进行无线多媒体通信。

不同于民用互联网,战术通信系统中所有通信节点及用户都具有移动性,包括用户(单机)/用户群的移动、单车的移动、指挥车的移动以及子网的移动。对于常规网络,网络拓扑结构基本稳定,不会出现频繁的网络拓扑结构变化。但在战术通信网络中节点具有任意移动性,在移动过程中由于节点的损毁、无线发信装置发送功率的变化、无线信道间的相互干扰以及地形等因素的影响,无线传播条件随时间快速改变,通过无线信道形成的网络拓扑随时都可能发生变化。

网络的移动性是造成战术通信系统与其他系统差异的根本所在。因此战术通信系统 $G(N, E)$ 中某个节点对 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间的通信信道 $c_{ij}(t)$ 是一个与运动模式、速度以及节点之间的距离、地形条件甚至气象条件有关的一个变量。由于运动的连续性与电磁传播特性的影响,因此 $c_{ij}(t)$ 可认为是一个与 t 有关的变量, t 是具有与时间特性类似的一个连续状态的自变量, $c_{ij}(t)$ 则是一个离散状态的变量,这给系统仿真带来很大的难度,使得它不能采用传统的连续系统或离散系统的经典仿真方法来构建。由于移动性所造成的 $c_{ij}(t)$ 时变特性也造成了网络模型 $G(N, E)$ 的时变(或叫网络拓扑的动态变化),这给网络建模与刻画带来了极大的难度,造成了状态空间的无限扩大,使得对战术通信网建立完备的数学解析模型并通过数学模型解算网络性能变得几乎不可能,必须通过仿真与数学模型结合的方法来进行性能预测,而且仿真系统的建设方法也不能单纯地采用连续系统或离散系统的经典仿真方法来构建。

(4) 网络的自组织性

战术通信系统在使用时具有快速部署、随遇通信等特点,因此需要网络具有自组网的特性,网络的各种通信设施可以随着需要而移动。同时当网络节点毁坏时,网络能自动进行重组,规避可能的风险,这与传统的蜂窝移动网络和无线局域网的典型有中心结构完全不一样。

战术通信系统主要采用无中心的网络结构,也就是无线自组网(Ad hoc Network),也被称为多跳无线网(Multi-hop Wireless Network)。无线自组网由一组自主的无线节点相互合作而形成,独立于固定的基础设施,是一种自创建、自组织和自管理的网络,能快速构建一个移动通信网络。与传统的蜂窝移动网络相比,自组织网络的节点分布式运行,具有路由功能,负责发现和维护其他节点的路由,并向邻居节点发送或转发。

战术通信网的自组织特性使得在设计网络时,不仅要设计灵活的网络结构,而且要

设计网络结构必须满足的约束条件 R_u ，以此来约束网络动态自组织时的行为，确保网络的整体性能指标在各种动态过程中仍能满足网络的设计要求。网络的自组织性还带来了网络模型刻画难度，使得从网络外部无法准确预测网络的内部行为，因此简单地通过网络模型来预测网络性能是不可靠的，必须对网络模型的每个网元的各层协议进行建模仿真，才能真实反映战术通信网整体的动态行为。即必须对 $G(N, E)$ 中的 N 进行深入的刻画，才能更准确地预测网络的性能。同时由于节点毁坏、网络规划、通信条件等将引起网络某些节点在某些过程中会动态加入或退出网络，因此 $G(N, E)$ 中的节点 N 的数量不是完全不变的，这给网络设计带来了诸多变数。

(5) 多跳通信

从上面的通信网络结构分析可以看到战术通信系统一般是由多个无线网络构成的分层分布式网络结构。由于无线收发信机通信距离有限，当无线网络中移动节点要与其覆盖范围外的节点进行通信时，需要通过中间节点进行多跳转发。同时在作战任务变化过程中，节点的位置相对变化，也可能造成某时刻可直接互通的节点在下一时刻需要通过其他的节点中继来转发信息。

战术通信系统的多跳特性使得网络设计与性能验证变得极为复杂，使得网络的性能指标随着组网模式的变化而波动。性能的波动使得必须通过统计的方式来获得网络的期望性能，这使得通过仿真来获得网络的总体性能变得非常必要。同时，多跳通信使得原本处于同一子网的节点可能收不到广播信息，因此必须对原有的广播方式进行改变。

此外，战术环境下，由于竞争共享无线信道产生的碰撞、信号衰减、噪音干扰、信道间干扰等诸多因素，战术通信网络内的实际带宽要远远小于理论的最大带宽值，并且各个信道的实际速率处在不断变化中。在某些情况下，即使某两个节点对之间的可用信道速率大于业务速率，也可能发生业务服务质量无法得到保障的情况，因此，对一些高优先级的业务，即使它的带宽需求很低，往往也需要选择具有较高带宽的链路或节点进行中继转发，这给网络运行维护带来极大的困难，降低了网络资源利用率。因此在设计网络的管理控制方式和组织运用方式时，除了考虑用户需求和分布以外，还必须考虑业务的性能要求和优先级。

(6) 其他特点

除了上述特点之外，战术通信系统还具有有限的带宽和变化的链路容量、分布式网络控制、高的可靠性与安全性要求、设备要求小型化等特点，这些特点也是战术通信系统设计需要考虑的因素，是仿真系统要研究的目标。

1.1.3 外军战术通信系统发展状况

从 20 世纪 60 年代起，美军就开始建设栅格状的战场通信网，80 年代后，随着信息技术的进步和发展，美国和英国、法国等北约各国普遍建立了这种栅格状结构的自动化

数字保密通信网，并成为日渐完善的全球信息栅格（GIG）的雏形。由于战场网络的神经末梢是战术系统，在未来战场网络化过程中，美军高度关注其战术通信系统的发展，美军的战术通信系统发展可分为以下几个阶段。

（1）综合战术通信系统（INTACS）

由于该系统不具备移动和空中通信能力，目前已经成为非主流战术网络通信系统。综合战术通信系统的主要设备包括符合欧美相关标准的设备，具有保密性高、可靠性高等特点，采用有线（光缆）和无线（高频和特高频）传输介质构建通信网并可随时重新组网，最多可容纳 480 个用户，可提供电报、电话、传真和数据通信业务。

（2）移动用户设备系统（MSE）

MSE 系统是美国陆军军师级战术通信网，是根据“地空一体作战”的思想而设计的。MSE 实际上是为固定指挥所研制的一个半固定的通信系统。在伊拉克战争期间，MSE 暴露出众多问题。首先，尽管这些年来美军对 MSE 进行了多次改进，仍不具备当前要求的动中通能力，工作范围也只有 15 千米，并无法跟上陆军的推进速度。MSE 的这些弱点还“牵一发而动全身”，严重影响了主要依靠它交换信息的陆军作战指挥系统（ABCS）中的多个分系统，包括机动控制系统（MCS）、全信源分析系统（ASAS）、高级野战炮兵战术数据系统（AFATDS）、联合预警系统（JEWS）和自动化纵深作战协调系统（ADOCS）等。因此，第 3 步兵师战后报告认为，MSE 是“一个必须尽早更换、过时的系统”。其次，班级通信是软肋。尽管伊拉克战争中美军地面部队班际和班内士兵间的通信较之海湾战争时有了长足进步，但仍被美军高层领导视为最担心的问题。陆军精心构建了一个联接所有联军地面部队的通信网，能为指挥官提供清晰的战场态势图；但信息流却不能延伸到位于战术链最末端的快速机动且分散的作战人员那里。最后，冗余设备太多，指战员要从许多不同的系统和网络接收信息，往往处于信息超负荷的情况下，反而影响他们及时做出正确的决策等。

（3）战术互联网（Tactical Internet, TI）

1996 年美陆军通过商用标准 Internet 规程（IP）、战术多网网关（TMG）和互联网控制器（INC）将 SINCGARS、EPLRS 和 MSE 三种战术通信系统互连组成战术互联网（TI），可为各种作战部队和平台提供数据、话音、图像和视频信号等大容量信息的传输线路，解决战术环境下移动数据通信等问题。

美军战术互联网系统组成如下：

- 单信道地面机载无线系统（SINCGARS）；
- 互联网控制器（INC）；
- 增强型位置报告系统（EPLRS）；
- 近期数字化电台（NTDR）；
- 战术多网网关（TMG）；
- 移动用户设备（MSE）战术分组网（TPN）。

美军战术互联网的体系结构如图 1.1 所示。

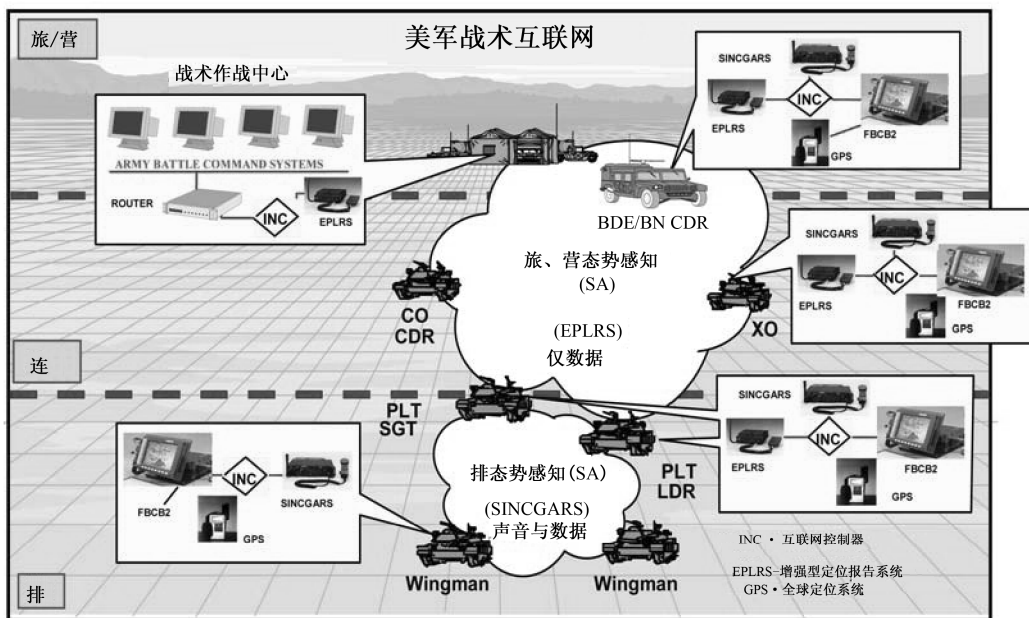


图 1.1 美军战术互联网结构图

（4）战术级指战员信息网（Warfighter Information Network-Tactical, WIN-T）

WIN-T 是美国陆军机动、高速、大容量骨干通信网络，将地面作战人员与指挥官和全球信息栅格联系在一起，是陆军下一代战术通信系统，用于替代 MSE、Tri-Tac 等系统。WIN-T 大量采用符合联合技术架构（Joint Technical Architecture, JTA）的商用现成技术，采用开放体系结构，方便将来吸收先进技术，并灵活地插入可用的技术改进型部件；WIN-T 的管辖区域从战区到营一级。在初始开发和作战测试中，WIN-T 项目小组在 4 个不同区域的 14 个网络节点上演示了机动、网络化的视距和非视距链路上传输基于 IP 的语音、视频和数据，自恢复网络工具，卫星跟踪和自适应信号恢复，实施态势感知下的网络作战，网络安全、安全通信以及协同工具等功能。

除美国外，英军现役的战术通信系统有“松鸡”战术通信系统（PARTMIGAN）、多功能无线电系统（MRS）和增强型 MRS 2000。“松鸡”是英军第二代语音数据通信系统，MRS 和 MRS 2000 属第三代，目前主要装备了北约和中东一些国家的军队。

法军装备的有里达（RITA）自动综合传输系统和改进后的 RITA 2000 系统以及第四代无线电系统 PR4G。其中，RITA2000 系统采用先进的交换体制、通信协议和传输设备，主要用于构建战役战术广域通信网，实现营以上大型指挥所之间的互连，在提供的服务支持能力上与固定网络基础设施相似，但能够根据需要部署于战场的任何地方并能够随着部队作战的推进提供不间断的作战地域内通信覆盖；PR4G 主要用于构建营以下

战术通信网，能够为指挥官提供灵活、反应迅速的通信链路，提供动中的话音和数据通信服务。

1.2 仿真技术及发展

1.2.1 仿真技术发展概况

仿真技术，如果从 1929 年美国空军飞机练习器——林克机为代表算起，已有半个多世纪的发展历史了。半个多世纪是仿真技术发展成熟的过程。科学发展也遵循自然规律，从简单到复杂，从对它的粗浅认识到深入了解，它发挥的作用，解决的实际问题，从辅助的科学方法到解决重大工程问题的必要手段，仿真技术在计算机技术、网络技术、图形图像技术、多媒体技术、软件工程、信息处理技术、控制论、系统工程相关技术的支持、交叉、融合下，逐渐形成了一门交叉科学，成为了认识客观世界的除理论、实验技术之外的第三种方法。

仿真学科的发展，有几个重要阶段，形成了一定时期的主导技术及学科方向。包括：

- 1945 年～1975 年 模拟计算（包括混合计算）及类比（相似）仿真方法与技术；
- 1975 年～1985 年 数字计算及数值仿真方法与技术；
- 1985 年～1995 年 网络计算及分布交互仿真方法与技术；
- 1995 年至今 一般建模与仿真理论及方法论。

模拟计算及类比（相似）仿真方法与技术，基于不同系统之间所具有的结构上的相似性原理，即数学模型上的相似性。一个机械的弹簧阻尼系统，与一个电的电感及电容电路系统之间，具有结构上的相似性，后者可以作为前者的模型进行仿真实验与研究。1945 年研制成功的电子模拟计算机，就是一个通用的类比仿真器，可用以建立具有微分方程数学结构的一类动力学系统模型。

1956 年国际模拟计算协会 AICA 的成立，表明类比仿真技术的主导地位。在随后的 10 年中，大量的模拟仿真专著出版，也说明类比仿真方法与技术的成熟。

数字计算及数值仿真方法与技术，是基于对系统数学模型的近似计算，即通过一组算法，把各种复杂的数学模型转化成为一组可迭代计算的算术运算。数值仿真的工具是数字计算机，一个可高速迭代运算的算术运算器。人们一般称这种模型为计算机模型。由于数字计算机的迅速发展，到 20 世纪 70 年代后期，数值仿真在交互性、实时性、精确性、灵活性和通用性等方面，都基本超越了类比仿真方法，取代了前者的主导地位。

1976 年国际模拟计算协会 AICA 更名为：国际仿真数学及计算机协会 IMACS，并召开了主题为“系统仿真”的第九届世界大会，这标志着面向系统的数字计算及数值仿真方法技术主导地位确立。

从严格的角度讲，网络计算及分布交互仿真方法与技术，应是数字计算及数值仿真方法与技术的一种延伸，因为从建模理论和方法学上看，它相对于后者并没有根本的变化。核心问题是，建立一个基于分布计算机网络的交互仿真环境；要解决的问题如资源共享、软件重用、时间调度，以及建立统一的框架、标准及规范等，大多属于仿真支撑环境的问题。从 1985 年到 1995 年这 10 年间，它一直主导了这一时期仿真学科发展的主要方向。其最有影响的一个成果，是高级体系结构（High Level Architecture, HLA）的研制与公布，它最终提供了一个复杂大系统分布交互建模与仿真的技术支撑环境框架、规范与标准。

1.2.2 网络仿真技术发展

网络仿真是近年才发展的一种新的网络辅助规划和设计技术，如果在真实的网络环境中进行性能研究、网络规划、设计和开发，不仅耗资大，而且在统计数据的收集和分析上也有一定困难。在实际工作中，往往通过网络仿真软件来模拟和估算其性能，通过模拟和仿真来调整一些网络参数以期达到最佳的使用效果。

网络仿真以系统理论、形式化理论、随机过程和统计学理论、优化理论为基础。网络仿真软件通过在计算机上建立一个虚拟的网络平台，来实现真实网络环境的模拟，网络技术开发人员在这个平台上不仅能对网络通信、网络设备、网络协议、网络规划以及网络应用进行设计研究，还能对网络的性能进行分析和评估。另外，仿真软件所提供的仿真运行和结果分析功能使开发人员能快速、直观地得到网络性能参数，为优化设计或做出决策提供更便捷、有效的手段。因此，运用网络仿真软件对网络协议、算法等进行仿真已经成为计算机网络通信研究中必不可少的一部分。

随着网络和通信技术的不断发展，网络仿真以其突出的优越性越来越受到网络研究人员的关注和重视。专用的网络仿真软件也因此得到快速的发展和更为广泛的应用。仿真软件的开发和完善不仅为网络技术开发、网络性能理论分析、网络设计方案评估及网络故障诊断等提供了强有力的工具，还大大缩减了开发时间，提供了研究效率。目前，各大学和研究所在进行网络研究和开发时普遍使用仿真软件进行网络环境模拟和网络性能测试分析。可以说，网络仿真软件的广泛应用既方便了网络技术的开发，又减小了投资、节约了资源。因而，必将得到更为广泛的应用。

网络仿真是一个很有用的网络研究工具，它以系统理论、形式化理论、随机过程和统计学理论、优化理论为基础。在设计阶段，仿真方法可提供一个虚拟模型来预测并比较各种方案的性能；运行阶段，通过对不同环境和工作负荷的分析和比较，来优化系统

的性能。在某些情况下,仿真是唯一可行的方法和技术。仿真方法的抽象化程度比数学分析方法低,耗费的时间比测量技术少,其低成本和有效性是其他传统方法不可替代的。随着网络新技术的不断出现和数据网络的日趋复杂,对网络仿真技术的需求必将越来越迫切,网络仿真的应用也将越来越广泛,网络仿真技术已成为研究、规划、设计网络不可缺少的工具。

基于美军战术通信系统仿真技术的应用与发展分析,未来战术通信系统建模与仿真技术的总的发展趋势将由单机(多CPU并行)仿真向分布式系统仿真方向发展,包括远程异地的分布式仿真系统的互联;逻辑时间上的系统仿真向实时的交互式系统仿真方向发展;单一的通信网络系统仿真向综合(C4I)应用系统(作战训练与演示)仿真方向发展;完全基于仿真工具构建的仿真系统向与实物系统进行结合的方向发展。

综上所述,仿真系统的发展主要可分为以下几个方面:

- 在体系结构上,由过去的集中式、封闭式发展到分布式、开放式和交互式,构成可互操作、可移植、可伸缩及强交互的分布式协同仿真体系结构;
- 在功能上,由原来的单一系统的性能仿真,发展到复杂环境下以多系统为基础的体系与体系对抗仿真;
- 在手段上,从单一的构造仿真、真实仿真和虚拟仿真,发展成集上述多种仿真为一体的综合仿真系统;
- 在效果上,由只能从系统外部观察仿真的结果或直接参与物理系统的测试,发展到能参与到系统中,与系统进行交互作用。

1.3 战术通信仿真

1.3.1 战术通信仿真需求

战术通信系统是战术力量高度整体化的“粘合剂”,将战场指挥控制、情报侦察、火力支援、电子对抗、防空控制、后勤支援互连为一个有机的整体,是作战地域内战术C4I系统的基础和载体。在高技术条件下的数字化战场,战术通信系统在网络结构、应用范围、技术的复杂性与多样性方面有了巨大变化,对网络的设计方法提出了新的要求。

过去,战术通信系统设计常采用的方法是以个人技术、经验为主,利用数学模型,辅之以试验和数学计算的方式,这种方法在网络规模较小、网络拓扑结构比较简单、网络流量不大的时候是可行的。而且在网络规模较小时,网络试验和数学估算也比较容易进行,其结果较为可信。

当网络应用的对象不断扩大、网络规模越来越大、网元类型不断增多、网络拓扑日趋复杂、网络流量纷繁交织时,以个人技术与经验为主的网络设计方法的弊端就越来越大。首先,网络设计者不可能对网络的每一个应用方向、每一种技术与设备都熟悉,因此在设计过程中主观的成分突出,缺乏科学的设计手段与依据;第二,一般情况下,不可能在网络设计阶段开展与拟建网络规模可比的试验网络来获得设计所需的依据,小规模试验是可行的,但是其结果受试验规模的限制,不能充分满足设计的需要;第三,数学计算和估算方法对于大型复杂网络的应用往往是非常困难的,网络的各种复杂应用也难以通过数学计算或估算来真实反映;最后,现代战术通信系统注重的是系统整体性能而不是某个关键技术的性能指标,因此网络整体性能的提高成为了网络设计的最重要的指标,如何衡量网络使用的关键技术对整体性能的影响需要一种科学客观的途径,而这些关键技术战术通信网特定的网络结构下的可行性与性能难以通过经验或数学计算等方法来获得。

另外,在战术通信系统设计过程中经常有多个不同的设计方案,有多种技术可供选择,它们往往是各有优缺点,仅凭个人主观判断,很难做出正确的选择,因此如何进行科学的比较和取舍是战术通信网设计需要重点考虑的问题。

近年来兴起的通信网络计算机仿真技术是一种利用数学建模、协议模型、实物模型和统计分析方法模拟网络行为,从而获取特定的网络特性参数的技术。它结合了分析方法、实验方法以及仿真方法的优点,能在网络设计阶段建立与拟建网络规模可比的仿真网络,并可通过实物系统增加系统与实际的贴合度,可在系统设计阶段就获得设计结果的性能预测,并对系统的运用方式进行模拟,从而提高系统设计的实用性、可靠性与科学性,降低网络建设的风险与成本。

由于通信网络计算机仿真技术的兴起和蓬勃发展,为战术通信系统的设计带来了一种新的思想和方法。利用计算机仿真技术来开展战术通信的网络设计,建立网络模型,分析出可能的网络拓扑结构与组网模式,并将所设计的通信网络的框架结构和协议抽象构成建立数学模型,以数学形式描述网络行为,并通过定义业务事件、协议流程等计算机手段仿真所设计网络的运行,从仿真结果中给出所关心性能的评估报告,以便及时发现并解决设计中的问题,为网络的设计与优化选择提供客观、可靠的定量依据,达到设计和优化设计的目的,缩短网络的开发与建设周期,提高网络建设中决策的科学性,降低网络建设的投资风险。

综上所述,战术通信网络规模大、网络类型多样、结构复杂、运用方式灵活、功能综合、影响因素多,并具有不同于其他网络的技术特点。采用传统的网络设计研究方法已经很难满足现在和未来战术通信网络的设计和关键技术设计,必须使用新的设计方法来满足战术通信系统建设和发展的需求。建立适应战术通信系统特点的分析、测试、评估的方法和仿真环境,是战术通信系统研究、开发、测试的必要途径与科学手段。因此,战术通信仿真需满足如下要求:

(1) 实现战术通信系统从协议、设备、系统多层次多粒度的仿真,实现大规模网络仿真,满足对战术通信系统不同层次上的分析和评估,此外,还能够与作战演练、指挥控制以及其他军事仿真系统实现联合仿真试验。因此,战术通信仿真必须基于分布式仿真架构进行构建,才能够适应大规模分布式交互仿真的需要,具有良好的互操作性和仿真资源的可重用性,可以集成同一任务领域里具有共同背景的多种仿真任务,能够实现不同仿真实体之间的交互和同步。

(2) 支持对战术通信系统协议级、设备级、系统级仿真,具有模块化组织运用能力,具有师、团、营、连、单车等多层次,协议、技术体制、设备、节点、系统等多粒度的仿真能力。这就需要基于战术通信系统的特点,研究制定合适战术仿真模型架构,实现模型的可重用性、可扩展性。

(3) 战术通信系统是一个复杂大型通信网络系统,如何保障战术通信仿真模型可信度,是战术通信仿真关键和评估分析的根本。在战术通信仿真系统里也必须运用工程化建模和验模技术,贯穿仿真系统的设计、开发、测试、应用和维护,才能够有效的保证仿真结果的可靠性。

(4) 在战术通信系统的装备建设过程中,由于受经费、技术条件、环境等因素的限制,搭建的原型试验系统往往在规模上无法满足设计要求,无法做到大规模的系统测试和评估。通过半实物仿真的手段,将原型系统和仿真系统互连起来,能够进行规模性的、压力测试。因此,战术通信仿真必须具有半实物仿真能力,能够应用于战术通信系统装备发展全生命周期的一套测试评估系统。

(5) 由于战术通信系统本身的复杂性、战术通信系统作战应用的灵活多变,节点的毁伤、节点的移动以及自然环境的等诸多因素都会影响到战术通信系统的性能。在进行战术通信仿真试验和分析的时候,战术通信仿真还需建立一套全面、合理、有效的系统试验方法和效能评估方法。

战术通信系统建设面临的军事需求不断变化和发展,同时受各种新兴技术的影响,其发展和更新的过程速度非常快,就要求我们采用超越当前采用的方法和设施。传统的第一步方法是仿真,目前仿真通常基于各种模型之上,要么这些模型的数据是推测而非实际得到,要么这些模型模型过度简化了实际上很重要的特征,如拓扑、管理策略、工作量等。要真正理解复杂协议和综合的网络体系结构,就需要大量的现场试验。为此,传统研究过程中的第二步是建立试验床,然而,试验床由于受经费和人力等诸多资源的限制,往往规模受限。此外,传统的试验床研究目标仅仅对提出的一种新体系结构进行测试和评估。但是这种方法不能反映未来发展状况,因此,没有理由认为这种新设计就是只有一种建议。

鉴于此,战术通信仿真需采用传统仿真与试验床相结合的方法,通过分布式半实物仿真技术建立一个开放的、大规模的、可信的战术通信仿真环境,才能够满足战术通信系统当前和未来的发展需要。本书正是基于这一需求,比较全面地阐述了战术通信系统

仿真的基本原理和方法,重点针对分布式仿真技术、半实物仿真技术、仿真建模技术、仿真模型可信度分析技术、仿真评估技术、仿真试验技术在战术通信系统中的应用进行了深入的研究和探索,并结合战术通信网络仿真系统建设的工程实践经验,给出了一个战术通信分布式半实物仿真环境具体实现和应用的典型范例。建立了适用于我军的战术通信系统仿真框架,探索系统仿真在我军通信系统发展过程中的应用模式,并制定系统仿真演进的技术路线。

1.3.2 仿真技术在战术通信领域的应用现状

仿真系统在国外发展很快。美国早期没有正规化的建模和仿真(M&S),但在第二次世界大战期间,“运筹学”的发展以纯数学模型开始填补这一空白。20世纪60年代,由于计算机的广泛使用,大量的“多对多”交战模型被用来描述各种敌友实体间的交互事件。70年代,M&S的独立应用激增,有了更详细的设计和交战模型。美国DOD自1972年开始将M&S列为重要的国防关键技术。80年代出现了模型分级体系,为仿真结果的逻辑一致性提供了一整套工具。同时,美国还通过建立相应的部门对国防M&S进行系统化、规范化的领导与管理。这些促进了军用仿真领域中武器系统研制半实物仿真技术、分布交互仿真技术、环境仿真技术、仿真软件平台技术和虚拟样机技术等迅猛发展。90年代,美国进行了“扩展的防空仿真系统”计划,该系统是用于攻防体系对抗研究的作战仿真系统。并于1995年发布了M&S总计划,把训练、决策支持和武器采办3项作为重点发展。同时把国防M&S看作是“军队和经费效率的倍增器”。美国海军在《2000~2035年美国海军的发展设想中》指出,要让M&S成为系统采办、兵力准备和作战决策不可分割的组成部分;使M&S技术支撑着创建和使用军事系统与部队的各个方面;同时需要通过制定海军和海军陆战队的联合战略,不断地对M&S技术进行研究。

我国对网络仿真技术的研究起步较晚,这主要有两个原因,一个是我国数据网络发展较晚,对网络仿真技术的需求相对不是十分迫切;另一个原因是主流的网络仿真软件基本上产自美国。近年来,特别是1998年以来,由于我国数据网络迅猛发展的拉动和美国解除高端网络仿真软件出口的限制的刺激,我国的网络仿真研究和应用逐步起步,陆续开展了网络协议开发、网络规划设计应用等方面的研究工作。

国内仿真技术发展虽然起步较晚但发展迅猛,在仿真平台方面,目前已经具有了国内自主研发的分布式仿真平台,有国防科大的KD-RTI、北航的BH-RTI,航天二院提出并开展的仿真网格技术研究项目和北京航空航天大学正在开发的基于网格的RTI等。相继建立了基于HLA架构的多个网络仿真系统,实现了多个仿真联邦成员之间以及实物与仿真的互联互通,实现了仿真试验全过程的控制与管理。但是国内的仿真技术与国外相比仍然存在不小的差距。主要表现在没有自主知识产权的仿真建模及运行引擎,开发出

的仿真模型没有很好的继承性、扩展性、移植性，因此，仿真模型的综合集成能力较差，仿真应用的范围比较受限，无法最大限度地发挥仿真的真正作用。此外，辅助建模工具的缺乏以及理论与方法相对于工程实践的滞后性都是当前战术通信仿真急需解决的问题。

1.4 主要仿真工具介绍

1.4.1 信道仿真工具

1. MATLAB

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司发布的主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。它将数值分析、矩阵计算、科学数据可视化以及非线性动态系统的建模和仿真等诸多强大功能集成在一个易于使用的视窗环境中，为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案，并在很大程度上摆脱了传统非交互式程序设计语言的编辑模式。

MATLAB 可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等，它的应用范围比较广，主要应用于工程计算、控制设计、信号处理与通信、图像处理、信号检测、金融建模设计与分析等领域。MATLAB 可以用来进行以下各种工作：

- 数值分析；
- 数值和符号计算；
- 工程与科学绘图；
- 控制系统的设计与仿真；
- 数字图像处理技术；
- 数字信号处理技术；
- 通信系统设计与仿真；
- MATLAB 在通信系统设计与仿真的应用；
- 财务与金融工程。

MATLAB 经过多年的发展，已成为国际控制界的标准计算软件，具有以下特点。

(1) 友好的工作平台和编程环境

MATLAB 由一系列工具组成，包括 MATLAB 桌面和命令窗口、历史命令窗口、编辑器和调试器、路径搜索和用于用户浏览帮助、工作空间、文件的浏览器。MATLAB 简单的编程环境提供了比较完备的调试系统，程序不必经过编译就可以直接运行，而且能

够及时地报告出现的错误及进行出错原因分析。

(2) 简单易用的程序语言

MATLAB 是一个高级的矩阵/阵列语言, 它包含控制语句、函数、数据结构、输入和输出和面向对象编程特点。用户可以在命令窗口中将输入语句与执行命令同步, 也可以先编写好一个较大的复杂的应用程序后再一起运行。

(3) 科学计算机数据处理能力

MATLAB 是一个包含大量计算算法的集合。其拥有 600 多个工程中要用到的数学运算函数, 可以方便地实现用户所需的各种计算功能。函数中所使用的算法都是科研和工程计算中的最新研究成果, 而且经过了各种优化和容错处理。在通常情况下, 可以用它来代替底层编程语言。在计算要求相同的情况下, 使用 MATLAB 的编程工作量会大大减少。MATLAB 的这些函数集包括从最简单、最基本的函数到诸如矩阵, 特征向量、快速傅立叶变换的复杂函数。函数所能解决的问题大致包括矩阵运算和线性方程组的求解、微分方程及偏微分方程组的求解、符号运算、傅里叶变换和数据的统计分析、工程中的优化问题、稀疏矩阵运算、复数的各种运算、三角函数和其他初等数学运算、多维数组操作以及建模动态仿真等。

(4) 图形处理功能

MATLAB 具有方便的数据可视化功能, 以将向量和矩阵用图形表现出来, 并且可以对图形进行标注和打印。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图像处理、动画和表达式作图。可用于科学计算和工程绘图。MATLAB 对整个图形处理功能作了很大的改进和完善后, 不仅在一般数据可视化软件都具有的功能方面更加完善, 而且对于一些特殊的功能要求 (例如图形的光照处理、色度处理以及四维数据的表现等), MATLAB 同样表现了出色的处理能力。同时对一些特殊的可视化要求, 例如图形对话等, MATLAB 也有相应的功能函数, 保证了用户不同层次的要求。

(5) 模块集合工具箱

MATLAB 对许多专门的领域都开发了功能强大的模块集和工具箱。用户可以直接使用工具箱学习、应用和评估不同的方法而不需要自己编写代码。目前, MATLAB 已经把工具箱延伸到了科学研究和工程应用的诸多领域, 如数据采集、数据库接口、概率统计、样条拟合、优化算法、偏微分方程求解、神经网络、小波分析、信号处理、图像处理、系统辨识、控制系统设计、LMI 控制、鲁棒控制、模型预测、模糊逻辑、金融分析、地图工具、非线性控制设计、实时快速原型及半物理仿真、嵌入式系统开发、定点仿真、DSP 与通信、电力系统仿真等。

(6) 程序接口和发布平台

MATLAB 可以利用 MATLAB 编译器和 C/C++ 数学库和图形库, 将自己的 MATLAB 程序自动转换为独立于 MATLAB 运行的 C 和 C++ 代码。允许用户编写可以和 MATLAB 进行交互的 C 或 C++ 语言程序。另外, MATLAB 网页服务程序还容许在 Web

应用中使用自己的 MATLAB 数学和图形程序。MATLAB 的一个重要特色就是具有一套程序扩展系统和一组称之为工具箱的特殊应用子程序。工具箱是 MATLAB 函数的子程序库, 每一个工具箱都是为某一类学科专业和应用而定制的, 主要包括信号处理、控制系统、神经网络、模糊逻辑、小波分析和系统仿真等方面的应用。

(7) 应用软件开发

在开发环境中, 用户可以方便地控制多个文件和图形窗口; 在编程方面支持了函数嵌套, 有条件中断等; 在图形化方面, 具备图形标注和处理功能, 包括对性对起连接注释等; 在输入输出方面, 可以直接与 Excel 进行连接。

2. Wireless InSite

Wireless InSite 是 REMCOM 软件包中一款对复杂电磁环境进行仿真预测分析的软件。Wireless InSite 采用高级的电磁处理方法, 使其可以在任意频段内提供精确的计算结果。软件主要用于对城市、郊区、室内等规则区域, 山脉、植被区等非规则地形, 机场、大型舰船等复杂平台的电磁环境预测分析。Wireless InSite 基于 UTD/GTD 理论, 采用射线跟踪方法建立传播模型, 使用了一些计算机图形的方法加速模型的建立和处理, 采用的算法当中包括 2D, 3D 以及快速 3D 的算法, 根据散射的特性以及跟物体相关的反射、透射系数评估电场、磁场, 通过将电场与具体的天线模式相结合来计算路径损耗, 到达时间以及到达角度等。

Wireless InSite 具有以下功能和特点:

(1) 丰富的图形用户接口

Wireless InSite 可以导入、编辑和显示几何特征 (如楼房、植被、地形等), 指定物体的电磁场特征, 天线的位置和特性, 指定场强点的位置, 设定频率和波形特征和计算参数, 选择期望输出参数, 为用户提供可视化结果输出。

(2) 几何和材质特性建模

Wireless InSite 能够完成多种类型的建模: 包括城市、室内、起伏地形、植被以及具体物体等。Wireless InSite 可以对建筑、地形以及植被的物质属性进行编辑, 用于确定物体的反射, 投射等特性。软件中还预定义了一些材质类型, 包括水泥, 木材, 金属, 玻璃等。物体的每个表面都可设置其物质属性, 在软件库中可以存储新的物质属性, 用户自定义的文件只要包含角度, 频率和极化相关系数, 就可以被系统所使用。

(3) 天线特性建模

Wireless InSite 拥有各种通用的天线类型, 并且可以进行参数调整, 包括线性偶极子天线, 喇叭天线, 贴片天线等。Wireless InSite 可以从外部导入 NSMA 格式、Odyssey 和 MSI Planet 格式的通信天线。用户也可以自定义文件用于全 3D 模式的导入。

(4) 统计量收集

Wireless InSite 可以收集大量统计量, 能够满足用户的各种应用。Wireless InSite 能

够收集的统计量如下所示:

- 接收功率;
- 路径损耗;
- 接收机的到达方向;
- 发射机的发射方向;
- 传播时延、平均到达时间、平均时延;
- 最强射线路径的到达时间;
- 传播路径;
- 复总电场;
- 最强射线路径的电场强度和相位;
- 最强射线路径的复冲击响应;
- 载干比 (C/I);
- 相对每个接收机的最强发射机;
- 多普勒频移;
- 功率时延特性;
- 电场强度 vs 频率;
- 电场强度 vs 时间。

对于这些统计量, Wireless InSite 提供了丰富的形式使得用户能够直观的对其进行查看。

3. SPW

信号处理工作系统 (Signal Processing WorkSystem, SPW) 是美国 Cadence 公司开发的信号处理工作系统, 是一种能对数字信号处理及通信系统算法进行开发、仿真、调试并进行性能估计的软件包。SPW 提供了计算机辅助工程设计工具及完整的 DSP 模块库。使用这些工具能建立任何类型的 DSP 系统并产生设计的硬件描述。

SPW 由一系列交互运行的集成工具组成, 典型的有方框图编辑器 (Block Diagram Editor, BDE)、仿真管理器 (Simulation Program Builder, SPS)、SIM (Simulation Manager) 以及信号计算器 (Signal Calculator, SigCalc) 等。方框图编辑器内有电子、通信、多媒体等模块库, 设计者可根据需要选取模块、连接并设置其参数。仿真管理器能对设计系统模型进行编译、仿真, 并提示修正设计错误。信号计算器是一种处理数字信号的工具, 可创建、显示、处理和分析各种信号波形, 并进行仿真结果的眼图、星座图、FFT 图等显示、分析。另外, SPW 软件还有滤波器设计 (Filter Design System, FDS) 和有限状态机 (Finite State Machine, FSM) 等集成工具。

SPW 采用系统模块直观地描述系统典型环节, 其模块库中提供了丰富的通信模块, 包括信号源模块组 (Signal Sources)、编/译码模块组 (Encoder/Decoder)、信道模块组

(Channels)、调制/解调器模块组 (Modulators/Demodulators)、滤波器模块组 (Filter)、均衡器模块组 (Equalizer)、输出池模块组 (Signal Sink), 以及数学运算模块组 (Math) 等, 利用 SPW 可以很方便地进行通信系统的仿真。

1.4.2 网络仿真工具

1. OPNET

OPNET 公司起源于麻省理工学院, 成立于 1986 年。1987 年, OPNET 公司发布了其第一个商业化的网络性能仿真软件, 提供了具有重要意义的网络性能优化工具, 使得具有预测性的网络性能管理和仿真成为可能。OPNET 公司最初只有一种产品 OPNETModeler, 到目前已经拥有 Modeler、ITGuru、SPGuru、WDMGuru、ODK 等一系列产品。

OPNET 公司的整个产品线能面向网络研发的不同阶段, 既可以作网络的设计, 也可以作为发布网络性能的依据, 还可以作为已投入运营的网络的优化和故障诊断工具。

OPNET 能够准确地分析复杂网络的性能和行为, 在网络模型中的任意位置都可以插入标准的或用户指定的探头, 以采集数据和进行统计。通过探头得到的仿真输出可以以图形化显示、数字方式观察, 或者输出到第三方的软件包去。此外, 一系列仿真运行的结果被自动整理到一个单一的 OPNET 输出文件中, 以便于比较分析。

OPNET 允许用户使用有限状态机开发自己的协议, 并提供了丰富的 C 语言库函数。OPNET 还提供外部模块访问接口, 方便用户进行二次开发, 支持面向对象的调试。对网络拓扑、节点/设备的体系结构、过程逻辑 (状态机)、传输等不同层次的、不同类型的模型, 都有专门的、符合人们习惯的工具来进行编辑和浏览。

OPNET 仿真模型库为客户提供了一系列的仿真模型。在这些仿真模型的基础上, 实现对网络的仿真。OPNET 仿真模型库与其网络仿真引擎是分离的。这种设计方式方便了模型的修改与升级。OPNET 提供的仿真模型库分成两类:

(1) 标准模型库

标准模型库可以满足大部分客户的需求。通常, 在 OPNET 的核心产品中, 已经包括了标准模型库。标准模型库分成下述几类:

- 数据链路层;
- 网络层;
- 路由协议;
- 传输层协议;
- 物理层;
- 实用程序;

- 综合仿真目标;
- 应用层;
- 无线模型;
- 厂商设备模型。

(2) 特殊模型库

目前,特殊模型库包括下述几种模型:

- IP 多目广播模型;
- 基于电路交换模型;
- 多协议标签交换模型;
- 通用移动通信系统模型;
- 私有网间接口模型;
- OPNET 分析环境;
- 客户/服务器;
- 电路交换;
- SimFusion。

2. QualNet

QualNet 是美国 SNT (Scalable Networks Technologies) 公司的产品,其前身是 GloMoSim, 源于美国国防部高级研究计划署 (DARPA) 的全球移动通信计划, 主要对无线移动通信网络进行了优化处理, 从仿真速度上得到了很大的提升, 同时通过对无线信道和射频技术的建模, 也保证了较高的仿真精度。QualNet 是一套能够完全满足客户进行网络建模和网络仿真要求的工具。QualNet 的仿真引擎具有非常出色的可扩展性, 并且可以提供上具有千个节点的高保真网络模型。QualNet 充分利用计算资源和能够在令人满意的时间内, 对有着大量信息流和高移动性大规模的网络进行建模。即便是运行在笔记本电脑上, QualNet 也能够保持卓越的运行速度和可扩展性。QualNet 针对各项组网选项能够快速产生仿真结果。实时仿真是其另一个强大的功能。QualNet 具有 Batch 功能, 一次可以选择某些参数的不同取值, 只需执行一次, 就可以得到同一仿真场景下的不同协议或者同一参数的不同取值情况下的网络性能, 进行比较。QualNet 还具有仿真结果导出机制, 能将仿真产生的数据整理并导出, 节省使用者数据处理时间。

QualNet 主要由以下几个部分组成:

- QualNet Scenario Designer;
- QualNet Animator;
- QualNet Analyze;
- QualNet Packet Tracer。

3. OMNeT++

OMNeT++是 Objective Modular Network TestBed in C++的英文缩写,它是开源的基于组件的、模块化的开放网络仿真平台,是近年来在科学和工业领域里逐渐流行的一种网络仿真平台。OMNeT++作为离散事件仿真器,具备强大完善的图形界面接口和可嵌入式仿真内核,可运行于多个操作系统平台,可以简便定义网络拓扑结构,具备编程、调试和跟踪支持等功能。OMNeT++主要用于通信网络和分布式系统的仿真。

OMNeT++由六个部分组成:仿真内核库(simulation kernel library, Sim),网络描述语言的编译器(network description compiler, NEDC),图形化的网络编辑器(graphical network description editor, GNED),仿真程序的图形化用户接口(Tkenv),仿真程序的命令行用户接口(Cmdenv),图形化的输出工具(Plove 和 Scalar)。

Sim 是仿真内核和类库,用户编写的仿真程序要与 Sim 连接,Sim 在 OMNeT++中占据最为核心重要的地位。

NED 是模块化的网络描述语言。网络描述包括大量的对组件的描述,如通道、简单和复合模块的类型。这些组件描述可用于各种不同的网络描述中。NED 语言用来定义模型中的网络拓扑结构,较为简单的网络拓扑可以使用 GNED,但复杂网络的拓扑描述还应该用 NED 源文件方式书写。

OMNeT++的用户接口用于实现仿真程序的人机交互,OMNeT++允许模型内部机制对用户可视化,也允许用户启动和终止仿真,并更改模型内部的变量。OMNeT++中的图形化接口是一个用户工具,可方便用户了解模型内部的运行机制。

用户接口和仿真内核的交互是通过一个已定义的接口实现的。无须改变仿真内核,就可以实现不同类型的用户接口。同样无须更改模型文件,仿真模型可在不同接口下运行。用户可在强大图形化用户接口下测试和调试仿真程序,并最后可在简单快速的用户接口中运行,而且该接口支持批处理。

目前,OMNeT++支持两种用户接口,即 Tkenv 和 Cmdenv。对仿真进行的测试和调试可以在 Tkenv 接口下进行,Tkenv 是一个简便易用的图形窗口化的用户接口,Tkenv 支持跟踪、调试和执行仿真的功能。它在执行仿真过程中的任意时刻都能够提供详细的状态信息。Tkenv 的主要特征有:各模块的文本输出有其独立的窗口,仿真过程中可以在 Tkenv 窗口中看到自传消息,支持仿真动画,标记断点,具有检查窗口,可以检查和改变模型中的变量,执行过程中仿真结果的图形化显示并且结果可以用柱状图和时间序列图显示,仿真可重新进行,快照文件用于显示模型的详细信息。

Cmdenv 接口用于实际的仿真实验,支持批处理。Cmdenv 是一个简便的小型命令行接口,执行速度快。它可以在所有操作系统平台上运行。Cmdenv 可以一次批处理配置文件中所有的仿真。

4. NS-2

NS-2 由 UC Berkeley 开发而成。NS-2 是一种面向对象的网络仿真器，本质上是一个离散事件模拟器，所有的仿真都由离散事件驱动的。目前 NS-2 可以用于仿真各种不同的 IP 网，已经实现的仿真有：网络传输协议，如 TCP 和 UDP；业务源流量产生器，如 FTP、Telnet、Web CBR 和 VBR；路由队列管理机制，如 Droptail、RED 和 CBQ；路由算法，如 Dijkstra 等。NS-2 也为进行局域网的仿真而实现了多播以及一些 MAC 子层协议。

NS-2 使用 C++和 Otcl 作为开发语言。它包含仿真事件调度器、网络组件对象库以及网络构建模型库等。事件调度器计算仿真时间，并且激活事件队列中的当前事件，执行一些相关的事件，网络组件通过传递分组来相互通信，但这并不耗费仿真时间。所有需要花费仿真时间来处理分组的网络组件都必须使用事件调度器。它先为这个分组发出一个事件，然后等待这个事件被调度回来之后，才能做下一步的处理工作。事件调度器的另一个用处就是计时。由于效率的原因，NS-2 将数据通道和控制通道的实现相分离。为了减少分组和事件的处理时间，事件调度器和数据通道上的基本网络组件对象都使用 C++写出并编译的，这些对象通过映射对 Otcl 解释器可见。当仿真完成以后，NS 将会产生一个或多个基于文本的跟踪文件。只要在 Tcl 脚本中加入一些简单的语句，这些文件中就会包含详细的跟踪信息。这些数据可以用于下一步的分析处理，也可以使用 NAM 将整个仿真过程展示出来。

美国华盛顿大学的 Thomas R. Henderson 教授及其小组在美国自然科学基金 NSF 的支持下，于 2006 年开始研究一个全新的网络模拟工具 NS-3，并于 2008 年 6 月发布了第一个稳定版本 NS-3.1。NS-3 是在广泛吸取现有网络模拟器，如 NS-2，GTNetS，yans 等的成功技术和经验的基础上开发的，专门用于教育和研究用途的离散事件模拟器。它基于 GNU GPLv2 许可，可以免费地获取、使用和修改。

作为开源网络模拟器 NS-2 的替代者，NS-3 没有采用 NS-2 的架构，而是进行了全新的设计和实现，在实用性、兼容性、易操作性、可扩展性等方面有突出的表现。虽然 NS-3 刚刚发布，在功能模块上与 NS-2 相比还有很大差距，但是由于 NS-3 极其贴近现实的设计和强大的可扩展性操作，使得在进行新的课题研究的时候，可以很方便地建立网络模型并进行代码实现，真正的将易操作性和可扩展性结合了起来。

1.4.3 系统仿真工具

1. SA

企业体系结构建模软件（System Architect，SA）由 IBM 公司开发的一款体系结构开

发软件。它支持广泛的建模语言和模型,包括: IDEF0 功能模型、IDEF3 过程和状态模型、IDEF1X 数据模型和 UML 语言等。SA 中的 DoDAF 框架模板将采用不同建模语言,不同描述形式的所有 DoDAF 产品集成到了一个统一的开发界面中。使用单一数据库存储相互关联的产品,并支持多用户同时开发。利用体系结构产品间的数据冗余性,SA 支持多种产品自动生成和产品间数据协调功能,实现一次输入,多次引用的目的。SA 具有文档生成和发布功能,支持用户定制的 Word 文档和 Web 网页生成。同时提供二次开发接口,可以定制用户自己的体系结构开发环境。

SA 还具有通用型体系结构开发软件的如下工具:

(1) 体系设计工具

体系结构设计工具为用户在分析作战应用系统时提供捕捉需求信息的工具,其框架浏览器(Framework Browser)可以浏览和访问开发的作战应用模型,并支持目前所有的框架结构,如 Zachman Framework, DoDAF (C4ISR Framework), 以及 TOGAF (The Open Group Architecture Framework)。

(2) 功能分析工具

功能分析工具提供功能建模框图,用户可以从作战需求的角度进行功能建模、组织建模,以及网络体系设计。它支持新的功能建模(Business Process Modeling Notation, BPMN),支持 IDEF 系列规范。

(3) UML 开发工具

UML 是统一建模语言,具有广泛的应用前景,目前很多系统是基于 UML 进行顶层设计的,使用用例分析描述用户的需求功能,可以详细描述用户的活动图、时序图、协作图和状态图,建立系统动态模型,完成类、组件的设计和开发,并提供多种语言的正向工程和逆向工程,以及代码实现、设计跟踪和文档报表生成。

(4) 体系结构数据建模

体系结构数据建模是针对系统中用到的数据进行逻辑建模和物理建模,并进行数据库脚本的正向和逆向生成。

(5) 结构分析/设计

系统通过使用 Gane 和 Sarson 技术、Yourdon/DeMarco 技术、Ward 和 Mellor 技术,以及 SSADM 方法,保留了对传统结构分析和设计的支持。

(6) 需求管理与测试

系统为用户提供需求跟踪、生成测试计划,需求变更维护等功能。并以 Microsoft Word 或 Excel 生成相应管理文档,也可以使用其导入/导出功能和知识库,方便地将那些信息集成进体系结构模型中。

2. CASSAP

CASSAP 是美国 Synopsys 公司开发的一款仿真软件,主要应用于数字信号处理和网

络通信领域，它可以在概念、体系结构、算法三个层次上实现仿真。CASSAP 采用了数据流驱动仿真器，它比基于时钟周期的仿真器速度提高了 8~16 倍。CASSAP 提供了 1000 多个高层模块，并可对其中所需模块自动生成行为级或 RTL 级 VHDL，也可生成各种风格的 DSP 代码，供 DSP 处理器作软件实现。CASSAP 可广泛应用于需分析和评估算法、实现方式的数字传输系统，如通信、图像、多媒体等，并提供了针对 GSM、CDMA、DECT 等标准的专用开发平台。

第2章 国外战术通信仿真系统

军用仿真技术是指用于国防和军事领域的仿真技术，它是系统仿真应用领域的一个重要分支和难点。仿真技术的军事应用是推动系统仿真技术发展的重要源动力，是牵引仿真技术的生命线。美军军事仿真技术一直走在世界军事仿真技术的前列。本章主要选择目前美军具有代表意义的 JCSS, JWARS, JMASS, STOW 仿真系统进行介绍，通过介绍这些系统可为我军军事仿真和民用仿真系统的设计提供经验，了解美军仿真系统的建构理念和先进技术等。

2.1 概 述

随着科学技术的飞速发展，建模与仿真技术（M&S）已日渐发展为独立于理论研究、实验与试验研究的一种基本科学活动。M&S 技术也为制定与修改作战方案带来显著的效果，使美国军方在战后对 M&S 技术的发展愈加重视，采取了一系列政策、措施，增强对 M&S 技术发展的领导、协调与管理，并将 M&S 作为七大技术推动力之一，要求在原有基础上，建立更为先进、高效和高度一体化的 M&S 设施。

近年来，军用仿真技术的发展尤为迅猛，主要表现为：武器系统的仿真已经从武器系统研制的局部阶段仿真发展到全生命周期仿真；多武器平台体系对抗仿真已经成为武器装备发展规划及计划制订的依据；体系对抗仿真已成为打赢高技术条件下局部战争的战法研究及大规模部队训练必不可少的手段。

美国国防部一直将建模与仿真列为重要的国防关键技术，并建立了世界上最完备的作战仿真体系。早在 1983 年，美国国防部高级研究计划署（DARPA）与陆军共同制订了仿真组网计划。该计划的目标是将分散在各地的坦克仿真器用计算机网络连接起来，进行各种复杂作战任务的训练和演习。后来，为了增加联网仿真器的数量，大幅度提高联合仿真能力，美国开始开发先进分布仿真技术，建立了一套基础的、起支持性作用的标准规范，并于 1989 年逐步发展成异构型网络互连的分布式交互仿真（DIS）。随着 DIS 应用领域的拓展及作战需求的增长，美军于 1990 年又提出了聚合级仿真（ALSP）的概念，并于 1992 年开发出第一个投入使用的协议和相关支撑系统，支持该年度美、德、日、韩的军事演习。1992 年 5 月，美国国防部提出了“国防建模与仿真倡议”，要

求在全新的结构、方法和先进技术的基础上，建立一个广泛的、高性能的、一体化的、分布的国防建模与仿真综合环境。根据这个倡议，美国国防部于 1995 年 10 月公布了国防部建模与仿真主计划，决定建立一个通用的仿真技术框架以保证国防部范围内的各种仿真应用之间的互操作性，其技术框架的核心是高层体系结构（High Level Architecture, HLA）。HLA 充分吸收了 DIS 和 ALSP 的长处，用于对仿真系统进行集成。HLA 在 1998 年 8 月完成了基础定义，随后被北约各国采纳，2006 年 9 月被 IEEE 接受为标准。美国国防部规定把 HLA 作为美国国防部所有仿真的标准技术结构，并规定从 1999 年开始不再投资非 HLA 相容的项目，从 2001 财年开始淘汰所有非 HLA 相容的项目。随后，美军基于 HLA 开发了一系列先进的大型仿真系统，没有基于 HLA 标准的在研仿真系统也要求改造成能与 HLA/RTI 兼容。

2.2 JCSS 系统

2.2.1 JCSS 系统概述

联合战术通信仿真系统（Joint Communication Simulation System, JCSS）前身为 NETWARS（Network Warfare Simulation），美军 NETWARS 网络战仿真系统是一个政府出资建设的项目，目的是为美军或美国政府提供一个较为先进的网络仿真平台、工具，用于较可信地检测和评估美军通信网络（包含战术、战役与战略三个层次）的信息流运行状态与安全性、可靠性。该系统主要用于：支持政府网络建设财政预算、高层次采办与相关政策的定量评估，但是它的设计也可满足作战部队实时通信纲要、建议的通信技术评估及新的作战构想通信保障能力分析的需要。为了适应联合战术通信系统发展，2007 年，NETARS 升级为 JCSS，2007 年发布了 7.0 版本，2008 年发布了 8.0 版本，2009 年发布了 9.0 最新版本。下面基于最新的 9.0 版本研究其系统架构和模型设计。

2.2.2 JCSS 系统体系结构

JCSS 仿真系统的体系结构主要由以下三部分（模块）组成：

- 数据库，包括通信设备模型、作战设施（Operational FACilities, OPFAC）、部队现行组织编制和信息交互需求（Information Exchange Requirments, IER）；
- 想定创建图形用户界面（Graphical User Interface, GUI）；
- 仿真域，包含 OPNET 建模仿真引擎和想定转换模块。

以上各组件之间的基本关系如图 2.1 所示。

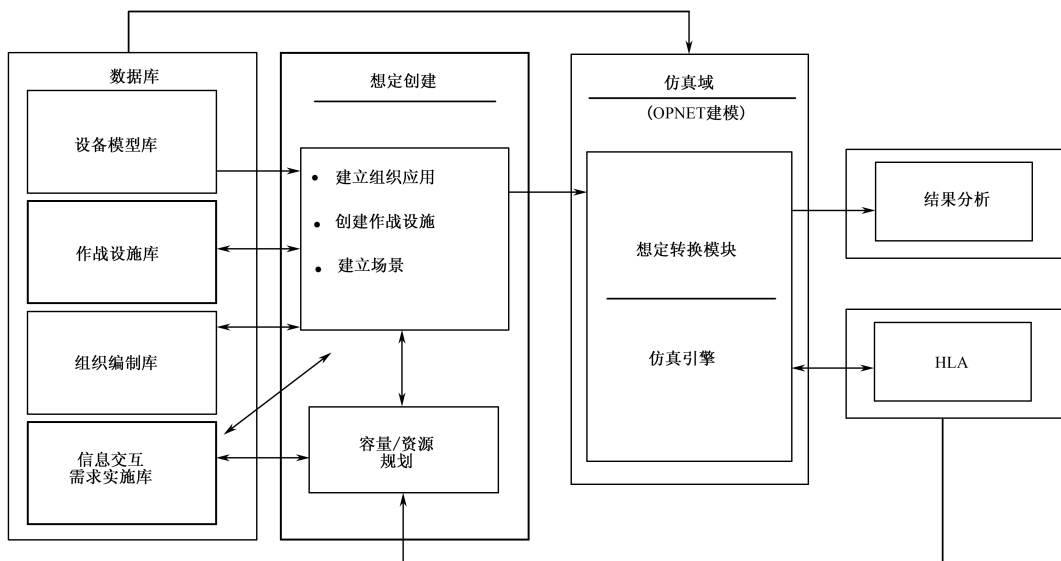


图 2.1 JCSS 系统体系结构

1. 系统数据库

(1) 设备模型库

设备模型或构件是通信装备的描述，由想定创建与仿真引擎组件使用。JCSS 标准设备库由 OPNET 标准商用设备（COTS）库和作为系统本身软件一部分的用户模型库组成。

(2) 作战设施库

作战设施库（Operation FACities, OPFAC）可以被理解为通信设备及其互连设施（备）的集合。OPFAC 被用于表达像坦克、舰船、飞机，甚至单兵这样的平台。它们能够沿指定路线机动。OPFAC 使用存储在 OPFAC 库中的 OPFAC 编辑器创建。一旦某个 OPFAC 已经被创建，它能够由它自身或作为组织编制的一部分在想定中部署。

(3) 组织编制库

组织编制库由一个或多个 OPFAC 组成。在组织编制内的 OPFAC 由各种通信连接设施（备）互连。这些连接设施包括点到点连接、无线连接与广播网络等设施。组织编制之间或组织编制与 OPFAC 之间也存在各种指挥或保障关系。这些机制与关系比较典型地反映了专门的作战原则，但很可能也表达用于研究目的的实验关系。一旦某个组织编制被创建，它就被存储于组织编制库中，由想定使用。对已经创建完成并被存储的组织编制机构的任何改变，将会影响到所有使用这些组织编制机构的想定。

(4) 信息交互需求实施库

每两个 OPFAC 之间, 信息交互需求 (Information Exchange Requirments, IER) 必须被说明。IER 依赖于 OPFAC 之间的关系类型。对于每一个 IER, 它实际上被激发的实例数依赖于它本身的分布均值、开始时间与停止时间。IER 有许多不同的提交方法。IER 能够通过数据库、文本文件或通过 JCSS 图形用户界面 (GUI) 来说明。想定创建器 (Scenario Builder, SB) 访问使用与 SQL 与 ODBC 兼容的关系数据库管理系统建立的数据库表, 然后 SB 经由仿真描述文件 (Simulation Description File, SDF) 以文本文件将此信息传送给仿真引擎 (Simulation Engine, SE)。IER 能够以 Microsoft SQL 数据库的形式进行, 然后经由开发编辑器输入到想定中。IER 数据库编辑器也能够用于查询目的, 然后将 IER 保存在数据库中。

2. 想定创建器

想定创建器允许作战人员在上节中所创建的 OPFAC、组织编制和 IER 一并协同转换成为一个单一的想定结构, 该想定能够被“翻译”成为文件形式并由仿真域和能力规划器处理。

想定创建器提供一个强有力的图形用户界面 (GUI) 和一个很重要的编辑能力, 它使得规划器/分析员能够重复运行“如果……, 则……”想定处置方案。想定创建器图形用户界面由以下 7 个主要的组件组成:

- 通用编制编辑器 (Generic Organization Editor, GOE);
- 部署编辑器 (Deployment Editor, DE);
- OPFAC 编辑器;
- 分析工具;
- 能力/资源规划器;
- 通信计划协同器;
- IER 数据库编辑器。

(1) 通用编制编辑器

通用编制编辑器被用于创建通用的或模板组织编制, 以使用户进行潜在的 JCSS 通信负载研究时能够重用。一旦通用组织编制被建立, 它就存储在通用编制库里, 以备将来使用。例如, 用户创建了一个海军陆战队排, 那么该排就能够反复使用, 直至建立了更大的组织编制, 如海军陆战队连。采用这种方式, JCSS 系统用户能够利用这个编辑器通过不断建立各种军事组织实体来创建一个通用的组织编制库。作为这个创建过程的一部分, 用户定义这个组织编制的层次结构与组织结构, 包括通信连接方式 (如点到点连接与广播连接网络) 及各战斗分队之间的关系 (如保障)。

(2) 部署编辑器

部署编辑器被用于创建具体的 JCSS 训练专用想定。在 DE 里, 用户可以选择感兴趣

的地理区,然后依照想定从通用组织编制库里选择作战部队(分队、单元)进行部署。

想定创建方式与组织编制在通用编制编辑器(GOE)里的创建方式基本类似,其主要不同点是创建想定过程要完成像作战单元位置、速度这样附加信息的定义。此外,DE还为用户提供了输入的管理通信信息负载的能力,这一过程主要基于在IER数据库里所获得的数据和其他前文信息交互需求介绍的IER文件来完成。

当作战想定建立后,用户就能够创建想定描述文件(Scenario Description File, SDF)。SDF是一个文本文件,描述了想定的所有信息。JCSS仿真域使用这一文本文件生成一个与OPNET兼容的仿真模型,然后使用该模型进行仿真运行。

(3) OPFAC 编辑器

OPFAC编辑器允许用户创建一个新的OPFAC或修改一个已存在的OPFAC。一旦OPFAC被创建,它就能够被存储在OPFAC库里,并且在通用编制编辑器(GOE)或部署编辑器(DE)里被使用。使用OPFAC编辑器创建的OPFAC采用两种格式化存储:一种格式是.pdf文件,是OPFAC的文件描述,由想定创建器使用;另一种格式是.nt.m文件,是一个OPNET网络模型,由仿真域使用。

(4) 分析工具

分析工具被用于分析仿真结果。在仿真完成后,仿真域将仿真结果以文本形式记录下来。分析工具读这些文件,并采用图形方式显示所读信息。

该分析工具支持标准的JCSS性能参数测度(Measures of Performances, MOP)。MOP集中于选定的通信装备收发信息能力的评估,如文件传输、态势预警更新、E-mail消息、数据库传输等。

(5) 能力/资源规划器

能力/资源规划器(Capacity/Resource Planers)提供了一个分析仿真模型,该模型能够将面向用户的普通需求翻译成为能力需求。用户使用能力规划器可以像部署编辑器创建IER一样创建需求。能力规划器将这些需求翻译成通信资源能力需求,而无须使用详细的仿真或通信装备模型。该工具使用分析技术确定通信带宽需求。能力规划器包含自己关于不同类型装备的信息流通行为状态的信息。连接信息采用两种方式提供:一种是OPFAC内部的连接信息,由部署编辑器想定提供;另一种是OPFAC之间的连接信息,由OPFAC库提供。当考虑想定中通信装备型(OPNET标准装备与JCSS装备)时,路由器需要进行计算。对于模型开发人员创建的新装备,能力规划器使用最短路径算法去计算路由器。在这个环境里,离散事件仿真所支持的精度反比于规划器直接响应的时间值。

另一方面,资源规划器是一个与能力规划器有反函数关系的分析工具。它许可用户在假定当前网络能力与连接约束的前提下,按照流量负载确定一个近于最优的网络配置。资源规划器通过减少由需求引起的负荷来优化网络配置。

（6）通信计划协同器

通信计划协同器（Communications Planning Coordinator, CPC）允许计划者使用自顶向底（Top-Down）的方法计划通信基础设施的部署。计划领导人（主计划者）建立计划视图，发送初始想定至下级计划者，以获得他们的输入并将他们的想定进行集成，建立主通信计划。任务需求、自由文本问题与作战想定能够在通信计划协同器里被创建，并且能够在不同小组与个人间以协同的方式使用。

（7）IER 数据库编辑器

IER 数据库编辑器允许用户输入、查询和修改在一个 MS SQL 库里说明的 IER。这些 IER 能够被用在由部署编辑器创建的想定中。这些 IER 的输入类似于通用 IER 从一个文本文件的输入。在想定中，要完成 IER 实例的输入，要求源 OPFAC 的类型、目标 OPFAC 的类型和它们之间的关系必须匹配。

3. 系统仿真域

仿真域主要由以下两个主要部分组成：想定转换模块与仿真引擎。

（1）想定转换模块

想定转换模块使想定创建器能够提供一个可识别的输出文本文件——想定描述文件（Scenario Description File, SDF）给仿真引擎。在仿真运行期间，想定转换模块转换包含 OPFAC、组织编制和在一个想定中创建的 IER 等信息的 SDF 文件，从而生成一个 OPNET 仿真模型。

（2）仿真引擎

仿真引擎是一个由 OPNET 技术公司研制的完全商业化（COTS）的产品。仿真引擎触发由想定转换模块从文本文件里创建的网络，并处理各种仿真事件，从而获得各种网络仿真设施（备）的性能参数，然后开发人员可以使用分析工具评估这些结果。

2.2.3 JCSS 模型结构与设计

JCSS 的仿真模型是构建 JCSS 仿真系统基础的组件，JCSS 规范了 2 层结构的标准建模参考模型，顶层为 OPFAC（Operational Facility）；底层为 OE（Operational Element）和 SE（System Element）。OPFAC 是搭载于特定平台（车辆、飞行器和舰船）上的一组通信装备的集合，它可以是通信网络的一个通信节点或一个通信子网。OPFAC 由一个 OE 和多个 SE 构成，OE 负责从外部得到仿真所需的环境（OPFAC 移动、状态和流量等）相关信息；SE 为具体通信设备的仿真模型，它又可分为 2 类系统要素，即 IS（Intermediate System）和 ES（Edge System）。ES 负责与 OE 的互连，以提取仿真环境信息、报告仿真流量状态等；IS 负责实现多个 OPFAC 之间的互连。

图 2.2 为 JCSS 的主要通信设备模型和工具模型层次图，JCSS 设备模型主要有 JCSS

标准模型和 OPNET 标准模型以及用户定制模型。以下列出了基本 JCSS 模型：

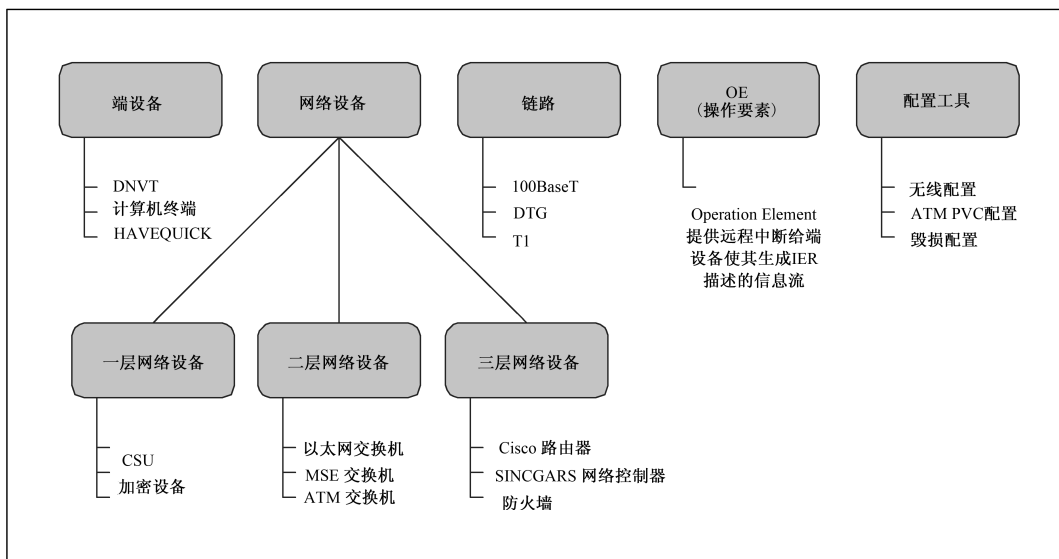


图 2.2 JCSS 模型层次关系

(1) JCSS 标准库

- 多路器 (Promina, FCC-100) ;
- 卫星 (TSC-85, TSC-94, DSCS, CSCI, GBS) ;
- 电路交换 (Len, Sen, TTC-39) ;
- 电台 (EPLRS, Sincgars RT, Havequick) ;
- 加密设备 (KG-84, KG-175) 。

(2) OPNET 标准库

- 数据链路 (以太、令牌环、帧中继) ;
- 网络层 (IP, RSVP, IPX) ;
- 路由 (RIP, EIGRP, OSPF, ISIS) ;
- 传输 (TCP, UDP) ;
- 物理层 (SONET, ISDN, xDSL) 。

JCSS 模型开发主要有两种方法：在已有模型基础上进行修改；创建新的模型。对于修改一个现有模型的开发步骤：

① 确定、选取最接近、最合适待创建的通信设备模型（可以从 OPNET 标准模型上修改）。

② 对于每个构建类，建模者必须说明属于这个类的设备功能与界面，同时，明确适应 JCSS 环境互操作要求的这个模型所需作出的变化和改进。

③ 在确定需要变化和更改的内容后，即对模型进行修改，包括修改节点端口数量和

类型；修改节点属性参数、修改节点的进程协议模型，以及统计结果等。

④ 对修改后的模型按照相关程序进行测试。

新建模型的建立步骤：

① 明确模型隶属的一个或多个构件类。

② 对于每个构件类，建模者需说明属于这个类的设备必须履行的功能与互操作需要的模块和属性。

③ 创建所有已经作出说明的模块、过程模型。

④ 在按照说明规范要求创建模型后，创建模型必须按照相关程序进行测试。

2.2.4 JCSS 信息交互流程

一个 IER 完整的信息流程为：首先由想定创建器插入到 SDF 文件中；由 OE 对其进行内容分解，再由终端系统设备进行数据信息生成、网络通信设备完成信息传输；再由另一个终端设备完成信息的接收，具体流程如图 2.3 所示。

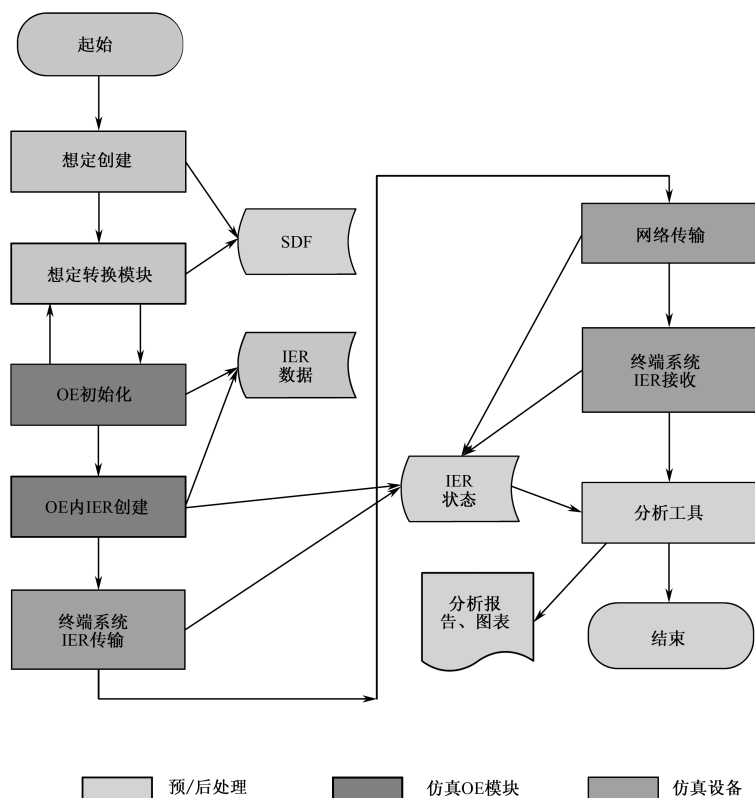


图 2.3 JCSS 信息流程图

2.2.5 JCSS 系统应用

JCSS 系统应用流程如图 2.4 所示, 仿真试验人员根据仿真目的进行仿真实定的创建, 仿真实定的创建要确定组织编制、地理位置、仿真开始时间与结束时间、通信装备参数、相关的信息流等仿真实定创建通过想定创建器以及所需的模型库构建所需的仿真场景, 仿真场景通过想定转换模块导入到仿真域中, 该仿真系统通过 HLA 架构互联外部其他相关的仿真系统, 运行分布式仿真最终获得统计结果和报表, 进行仿真分析与评估。

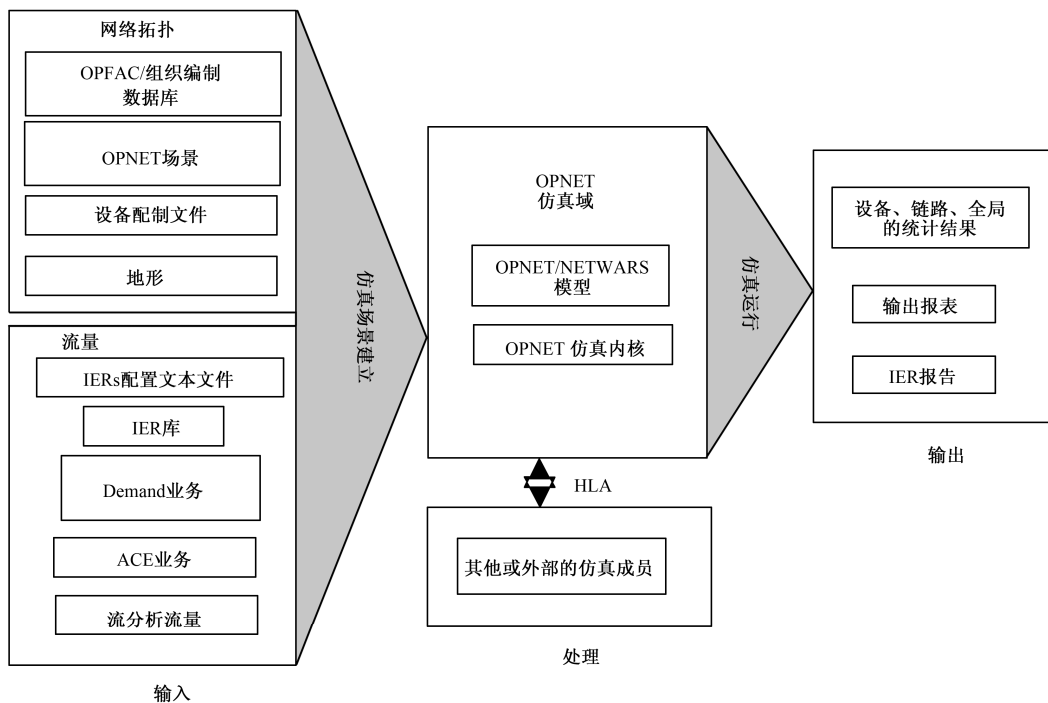


图 2.4 JCSS 应用流程

JCSS 仿真系统提供了测试和评估整个战术通信系统的建模仿真的能力, 提供了规划、优化、分析战术数据与语音网络的能力, 其应用于网络通信系统开发全过程。以下给出了一个 JCSS 应用 JNMS (Joint Network Management System) 规划各个阶段的实例, 如图 2.5 所示。

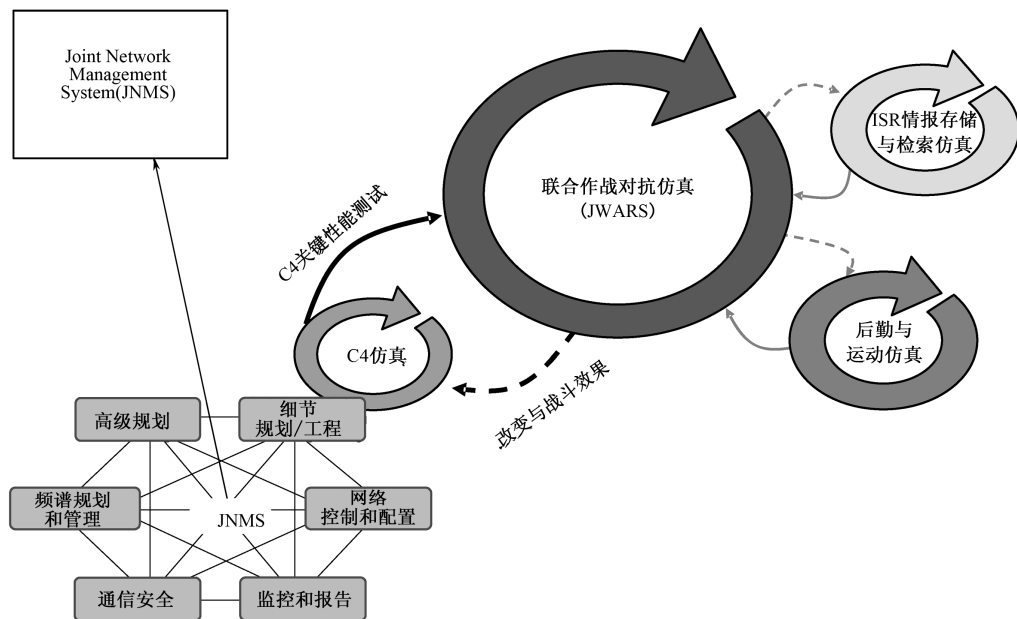


图 2.5 JCSS 应用实例

2.3 JMASS 系统

联合建模与仿真系统（Joint Modeling and Simulation System, JMASS）是在美国国防部部长办公室下属的高级指导小组（SSG）的领导下启动的，他们成立了一个联合项目办公室（JPO）来负责 JMASS 系统的开发。JMASS 是一个建模与仿真支撑环境，它支持在电子战环境下对武器系统进行工程级和战术级的建模与仿真分析、测试与评估。由于其具有良好的性能，被美军广泛应用。

建立 JMASS 系统的目的是在提供可重用的建模与仿真库（MSRL）的同时，开发一个标准的数字化建模与仿真体系结构和有关工具集，来支持武器系统的分析、开发、采办以及测试与评估。目前，系统主要支持在电子战分析中所用到的红、蓝方系统数字模型的开发，今后，系统将扩展到对多军种范围内武器系统的支持。

JMASS 项目是在美国空军电子战数字评估系统（ECDES）的基础上发展起来的，由于其良好的体系结构和一系列的标准，后来扩展到各军种，建立了多军种通用的体系结构和相关标准。

2.3.1 JMASS 背景与发展

作为美军三个“J”类重要项目中的一个，JMASS 的发展备受关注。JMASS 系统最初是为美国空军的电子战分析领域设计的，建立了相关的体系结构和标准。后来在国防部长办公室下属 CROSSBOW 委员会的资助下，于 1991 年 3 月建立了联合电子战数字仿真系统结构（JECDSA），同年 9 月更名为 JMASS。

JMASS 项目的发展主要划分为两个阶段，1998 年以前由空军负责开发，主要针对空军的需求进行研制。1998 年以后，由国防部牵头、空军为主来开发面向多军种应用的系统。

JMASS 联合项目办公室（JPO）于 1998 年 10 月 14 日在俄亥俄州的怀特-帕特森空军基地正式成立。1991 年 1 月，在 JMASS 项目各合作伙伴的帮助下，JPO 开始为 JMASS 确定采办策略，到了 1999 年 6 月，JMASS 项目办公室发布了它的需求建议。随后于 7 月份启动了它的软件工具来源的选择，对商业上可直接利用的工具（COTS）、政府部门可直接利用的工具（GOTS）以及一些无须开发的工具进行评估，以满足 JMASS 系统联合作战需求文档（JORD）的要求，1999 年 10 月开始下发合同。1993 年 1 月发布 JMASS1.0 版本，1993 年 10 月在 DMSO 的资助下发布了 JMASS2.0 版本。1996 年 9 月 JMASS3.0 版本发布，1997 年 12 月发布 JMASS3.2 版本。2000 年 1 月推出了 JMASS98V1.2。2001 年 6 月推出了 JMASS5.1 版本，2002 年 9 月发布了 JMASS6.0 版，到 2004 年发布了 6.2 版本。

2.3.2 JMASS 系统的设计目标

从用于作战分析的模拟系统的层次划分来看，这类系统主要包含三个层次：战役或战区级（Campaign）、任务级（Mission）以及工程设计和战术级（Engagement & Engineering），从上到下构成一个金字塔形的结构如图 2.6 所示，而 JMASS 系统就是针对底层的工程级武器研发和战术级作战仿真提供全生命周期服务。它主要根据高分辨率对象间的交互来实现对系统或子系统性能的分析。

联合仿真系统（JSIMS）主要应用在任务级仿真中，它基于一些高度详细的对象之间的交互对系统和子系统的性能进行研究；而联合作战系统（JWARS）则主要应用在战场/战役级仿真中，主要基于多天、多对多的剧情对兵力结构进行研究。通常，这 4 个层次的仿真可配合使用，低层次仿真的结果可供上层使用，逐级向上传递。即 JMASS 可以产生经过确认的、可供 JSIMS 和 JWARS 使用的数据。此外，由于 JMASS、JWARS 和 JSIMS 都支持 HLA 标准，因此通过 HLA/RTI 框架可实现它们之间的互连，从而实现多层次、多分辨率的建模与仿真，这种联合使得武器系统的开发者和评估者能更全面、

更深入地理解对武器系统和子系统性能的有效评估，并使得 JMASS 软件能在战场/战役级仿真中发挥更有效的作用。

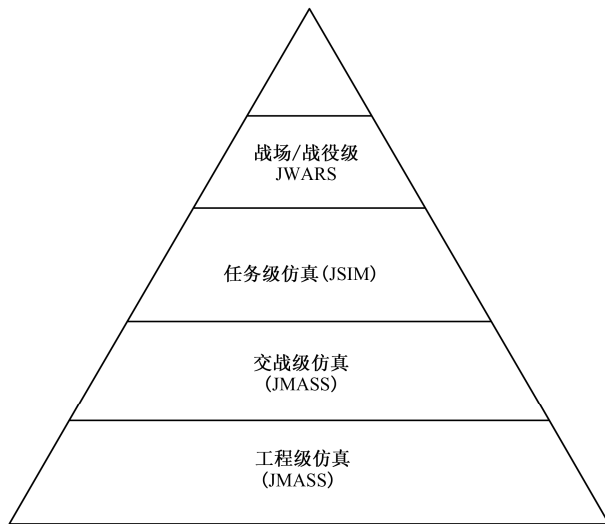


图 2.6 作战建模与仿真分析分层图

针对 JMASS 系统的设计需求，它的主要设计目标包括：

- 采用基于对象的设计以支持组件的重用；
- 采用领域专家提出的“分布式模型开发”策略；
- 采用即插即用的软件体系结构来连接有关的工具和模型；
- 采用一系列工具来支持对符合体系结构标准的模型组件的开发；
- 建立符合通用的软件结构模型（SSM）的对象模型；
- 建立模型和组件的资源库；
- 能够在主流的工作站（SUN，SGI 等）上运行；
- 采用开放式体系结构以支持符合 POSIX OS 标准的应用；
- 提供与现有标准的接口（如 DIS，HLA）；
- 实现与国防部和各军种需求一致的 VV&A 过程；
- 提供环境建模，支持全频段的分析。

实际上，JMASS 可以视为模拟系统的软件支撑环境，具有良好定义建模接口标准。JMASS 包括一组工具集，以帮助建模人员建立、配置模型，将这些模型集成到模拟系统执行以及对模拟运行结果进行处理，JMASS 为战术一级的建模提供了公共的作战模拟结构。基于 JMASS 的作战模拟系统的例子包括 JWARS 系统和 JSIMS 系统，它们都属于战役级的分析系统。JSIMS 主要面向作战参谋人员的训练，JWARS 则着眼于战役分析。

2.3.3 JMASS 系统的主要特点

JMASS 设计具有小巧、高效、健壮、可移植以及灵活的特点。它的内部采用微型内核的方法开发，几乎所有的功能都是用可替换的插件模块实现，并且经过了大量的内存分析和测试，以确保该架构不会把本身的缺陷引入到模型，更有效地支持了没有缺陷的模型的重用。JMASS 软件的结构框图如图 2.7 所示。

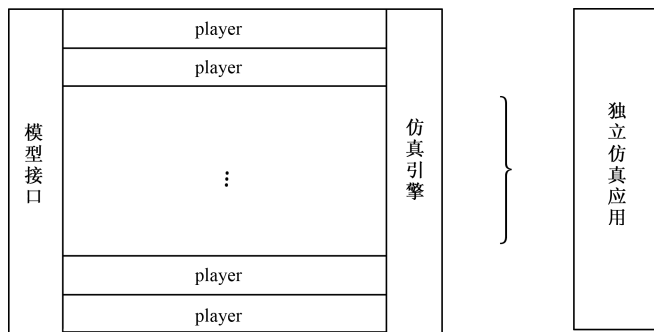


图 2.7 JMASS 软件结构框图

从 JMASS 软件结构框图可以看到，JMASS 提供了一个紧凑的软件框架，用于各种紧耦合模型的即插即用，软件主要由 3 个部分组成：**Player**（角色）、模型接口和仿真引擎。每个 **Player** 可由多层组件组成，是最高层次模型组件，通常对应真实战场实体（如雷达），多个 **Player** 的集合构成一个 **Team**（组）。模型接口主要指 **Port**（端口），**Port** 是 **Player** 之间传递通信消息的唯一通道，可以传递不同类型的消息。所有对象实体在仿真引擎驱动下运行，构成一个独立的仿真应用。

下面用一个直观的 JMASS 模型结构图来表示 **Team**（组）、**Player**（角色）、**Component**（组件）及 **Port**（端口）之间的关系。例如，仿真一架携带一枚导弹的飞机，整个仿真作为一个 JMASS 组，实体飞机和导弹可分别作为一个 **Player**。每个 **Player** 可由多个组件构成，而组件又可以由下一级的组件构成。如导弹 **Player** 可分别由控制计算机组件和动力学组件构成，动力学组件可进一步划分为制导对象和自动驾驶仪对象组件，这些对象还可用更基本的组件进行建模，如图 2.8 所示。

在 JMASS 中，**Player** 与组件的角色定义并不是非常严格，如飞机在某个特定的仿真环境中被定义为 **Player**，但在另一个仿真环境中（如在航母上）就可能被作为一个组件使用。这样设计有利于模型开发的分布式协作及重用。

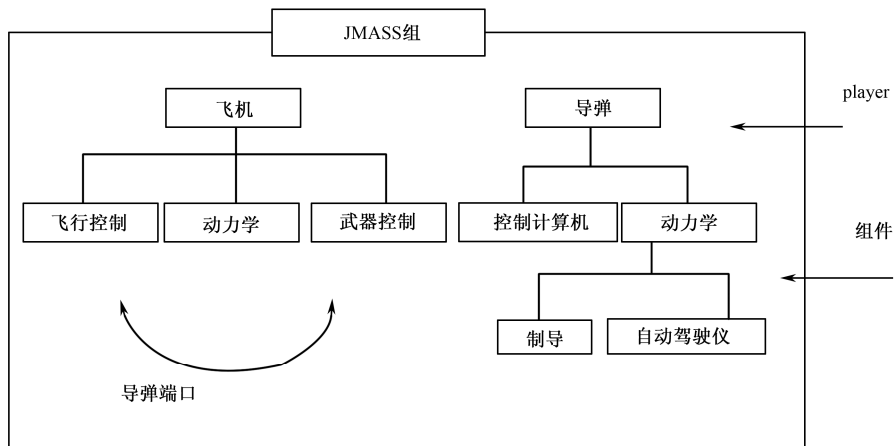


图 2.8 JMASS 模型结构示意图

归纳起来，JMASS 的主要特点如下：

(1) 采用面向对象的设计以支持模块的重用。这种重用包括 Player 一级重用，也包括组件一级重用。由于 JMASS 提供了与现有仿真标准的接口，通过 HLA 则可实现 JMASS 仿真一级的重用。

(2) 采用领域专家提出的“分布式模型开发”策略。从一开始 JMASS 就基本上是分布开发的。JMASS 模型均由那些对所开发的系统/现象表示方面具有权威性/专业性的机构/组织进行的，由于模型之间交互都是基于 Port（端口）标准机制，可通过分工协作进行分布式模型开发。

(3) 采用即插即用式的软件体系结构来连接有关的工具和模型。

(4) 采用一系列工具支持对符合体系结构标准规范的模型组件的开发，建立符合通用的软件结构模型（SSM）的对象模型，采用开放的体系结构以支持符合 POS IXOS 标准的应用，实现与国防部和各军种需求一致的 VV&A 过程。

(5) 建立了模型库。JMASS 的模型库是建立在标准的层次化文件系统的基础上的，分为两个主要区域：一个是开发区，另一个是基线区。所有模型的开发工作都在开发区中进行，如果模型已经过 VV&A，就可以移到基线区，基线区中的模型都是已经完成的，并且是可以正常工作的。

(6) 提供了支持电子战（包括射频/光电/红外/紫外/水声）对抗仿真所必需的自然综合环境效应模型及相关工具。该环境效应模型封装了现有的射频效应模型，如杂波模型、多路径和衍射模型等。其中杂波模型是根据林肯实验室对地面不同类型的划分，反复测量得到的数据建立的。这些特点通过对以下 JMASS 系统组成结构的研究，可得到更全面的理解。

2.3.4 JMASS 系统的组成

JMASS 系统由 4 个部分组成, 分别是系统的体系结构、已有模型功能集成、红方威胁模型以及蓝方数字化系统模型, 如图 2.9 所示。

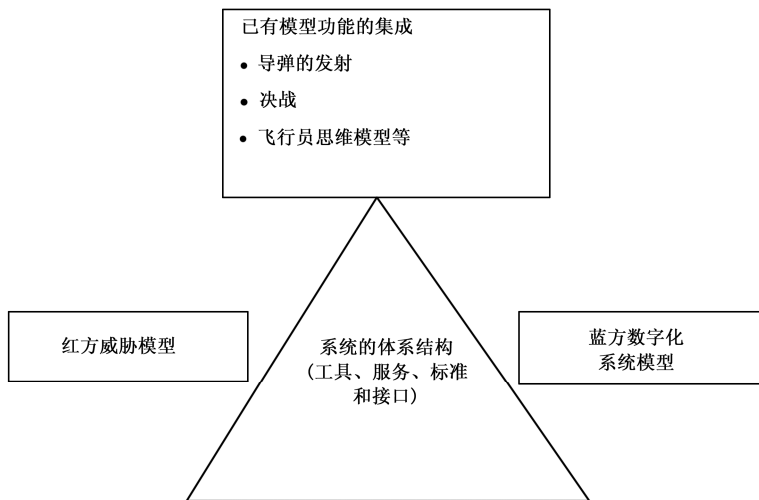


图 2.9 JMASS 的系统组成

用户基于 JMASS 开发仿真系统需要建立红方威胁模型、蓝方数字系统模型, 其中红方威胁模型主要由合适的威胁科学与技术情报中心开发、确认、拥有和维护。它们可以在不需要编写新代码的情况下插入 JMASS 中即插即用, 但必须经过重新确认。由于 JMASS 支持 HLA 标准, 因此通过 HLA/RTI 框架还可以将这些经过确认的威胁数字系统模型与其他可用的仿真互操作。蓝方数字系统模型是用户根据提供的威胁模型开发的自己的相应模型。

2.3.5 JMASS 的体系结构和模型

1. JMASS 系统的体系结构

针对过去国防部和各军种范围内独立开发和维护的建模与仿真系统, JMASS 提供了一个开放的系统级的体系结构, 它基于一组明确定义的接口标准, 来建立组件模型间的互相关系, 并提供了有关设计原理来指导模型的设计和改进, 同时它强调了用户的可用性。

这里首先介绍早期的 JMASS2.0 系统的体系结构。在 JMASS2.0 中, 包括一个模拟支撑的互连底板 (SSE IBP) 工具, 它采用具有单一接口的模型, 每一个具有单一接口的

模型表示一个工具，也称为代理。每个代理或工具作为客户/服务器在底板上注册，注册后的工具可以其他的工具提供服务，底板维护在其上面注册的工具，这些工具可以提供服务或者请求服务。

按照应用功能划分，JMASS 系统由 5 种工作模式组成，分别是开发模式、装配模式、配置模式、执行模式和事后处理模式。这 5 种模式也可以看做 JMASS 的主组件。

其中开发/装配模式为开发人员提供了构造模型对象的可视化环境，JMASS 提供了有关的工具使得模型开发人员将他们的注意力集中在算法的实现上，而不是在软件方面，其中 Builder 工具提供了代码的自动生成、编译和链接，它使得用户与编译器和文件系统相分离，但仍然通过 Makefile 实现具体的控制。自动化模型转换工具 (AMCTOOL) 则通过提供自动化的方法实现将 Simulink 模型转换成 JMASS 组件来支持模型的开发。

配置模式为开发者和分析者提供决定仿真系统具备何种特性的能力。通过交互式配置工具给模型组件分配属性，如配置异构网上不同的处理器，给对象配置合适的地理环境以及选择用来记录的数据等。

执行模式用来执行所选择的模拟应用，主要功能包括时间同步、空间管理、模拟日志、数据管理、地形表示和环境表示等，用 E2DIS 项目的成果来增强地形和环境的表示。

事后处理模式是在模拟应用执行完成后，利用有关工具来对仿真结果进行分析，其中提供了一个分析研究管理器：灵活的自动化研究工具 (FAST)。它主要支持工程设计方面的分析研究，FAST 分布于局域网中的多个运行仿真应用中，用来实现统计方面的分析，它同时也能够收集数据并提供用于数据处理和分析的工具。

JMASS 包括一个可视化的分析工具 SimView，用来对 JMASS 中模拟的实体的空间行为进行可视化的显示，SimView 的功能是通过 JMASS 中的 SpatialInfoPlayer 来实现的，开发人员并不需要在模型中添加其他额外的代码，它所提供的是在三维空间的可视化显示。使用 SimView 时，用户必须首先运行包含 SpatialInfoPlayer 的仿真想定，它产生一个包含所有需要进行想定回放的数据文件，后缀为 .sv。同时，JMASS 还包含一个跨平台的、能够进行事后处理参数绘制工具 JPlot。

JPlot 从在仿真想定执行过程中生成的 BJD 文件中读取数据，并将数据显示在一个电子制表软件中，用户可以从中选择用于绘制的行或列的数据。JPlot 还提供了大量的选项，如坐标轴的显示范围和风格，同一类型曲线的不同绘制方式，三维显示，网格显示/无网格显示，颜色编码等。

JMASS 中的互连底板体系结构 (Interconnect BackPlane Architecture, IBP) 提供了动态添加新工具的扩展能力，如图 2.10 所示。

它由三个“即插即用”的层次组成，最上面一层就是模拟支撑环境互连底板层 (SSE IBP)，它属于工具交互层，采用了基于 CORBA 的消息代理结构。SSE IBP 解决

了服务提供者的定位问题。中间一层是模拟运行时代理 IBP (SRA IBP)。在运行模拟系统时, 模拟小组在这里被连接, 每个小组由一个或多个称为“模拟成员”的模拟对象或实体, 以及必要的执行组件构成。最下面一层称为“模拟成员层”, 描述模型对象的连接。在 JMASS3.0 中, 为了支持 Internet 和处理器间的通信, IBP 发展成为多层结构, 增加了网络层、套接层、统一消息发送层 (UMP) 和 IBP API, 采用了像 UDP、TCP 等工业标准。其中 UMP 还包含了数据转换和 TCP 边界划分, 实现了组播传送。

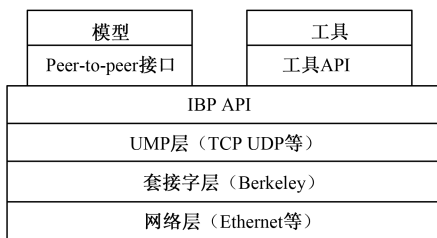


图 2.10 JMASS 的多层互连底板体系结构

模拟运行时代理 (SRA) 实现了对空间对象、时间对象、数据管理对象、日志对象以及其他非模型对象的封装, 采用了“即插即用”的结构, 可以对其中的某一对象进行替换而不影响其他对象。在 SRA 中, 每个模拟小组都是在共享内存中独立运行的, 因此采用套接口的通信方式速度更快一些。一个 JMASS 系统可以有多个 SRA, 每个 SRA 都在 SSE 层次的底板上进行通信。SRA 的结构如图 2.11 所示。

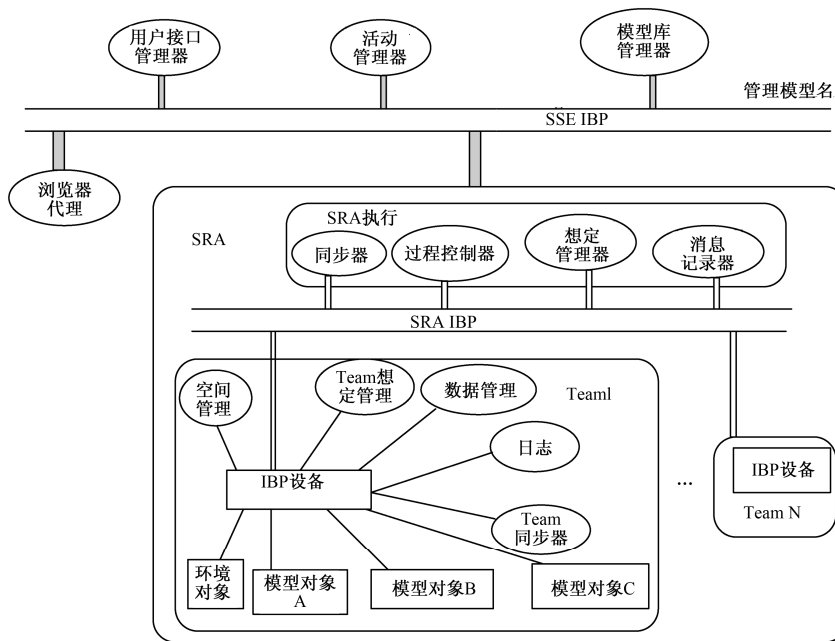


图 2.11 SRA 结构示意图

针对 JMASS 系统的模拟支撑环境 SSE 中的 IBP, 可以采用不同的技术参考模型来实现, 如 HP 的 Softbench, IEEE P1175, Atherton Backplane 以及对象管理组织 (OMG) 提出的 CORBA 技术等。SSE IBP 能够将在它上面注册的代理和系统中的其他代理的信息进行分离, 结构如图 2.12 所示。图中基础代理执行特殊响应, 是静态连接的, 在模拟过程中一直起作用, 而应用代理则是动态连接的, 它们通过 SSE IBP 进行通信, 并向用户提供模块化的服务。

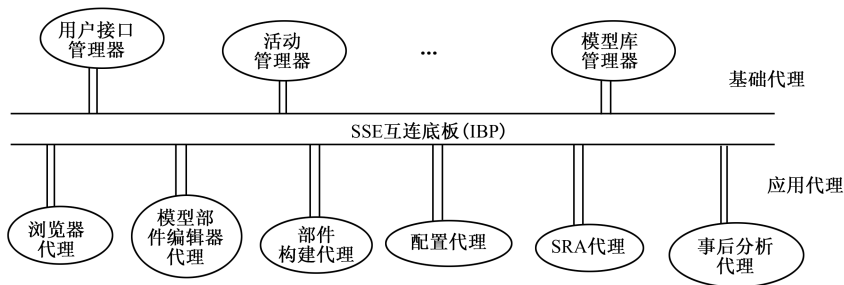


图 2.12 JMASS SSE 中的代理模型

JMASS 系统采用的是分布式架构方案。首先, 它的设计目标之一就是能在异构的分布式网络上运行, 包括对硬件在回路和人在回路的支持; 其次, JMASS 还能够提供对 DIS、ALSP 以及 HLA 等协议接口的支持, 能够实现与基于 HLA 的仿真联邦的无缝集成。

目前的 JMASS 系统的体系结构主要包括以下三个部分: 第一部分是模型标准, 其中包含可重用的软件结构化模型 (SSM) 和模型应用编程接口 (API); 第二部分是模拟支撑环境, 包含模拟引擎、可视化开发工具、分析工具以及商业上可用的软件和传统的工具接口等; 第三部分是模型库和资源库, 其中包含本地模型和数据库以及建模与仿真资源库。

作为最底层的基于战术一级的建模与仿真系统, JMASS 系统的优点主要体现在以下几个方面:

- 提供了一组用于开发、执行和分析的工具;
- 通过可重用减少了系统的代价;
- 提供了开放的、可扩展的体系结构;
- 在对 JMASS 模型无须改动的情况下, 提供了 HLA 的功能;
- JMASS 能够得到充分的技术支持, 并提供相应的培训。

2. JMASS 系统的模型

JMASS 是通过一组定义良好的 API 来提供与体系结构相关的服务。一般而言, JMASS 中的模型被视为角色 (Player), 它们通常是指客观世界存在的物理对象, 如飞

机、雷达、导弹、电子对抗（ECM）系统以及导弹导引头等。JMASS 支持多种不同的分辨率等级，其中，JMASS 模型的分辨率等级可以进行选择以适应将要运行的想定环境。JMASS 允许模型的分辨率等级在仿真应用中发生改变，也允许模型自身内部的分辨率发生改变。JMASS 所提供的 API 足够灵活，它能够处理从高到低不同分辨率的模型并把它们集成在同一个仿真应用中。模型的分辨率等级在很大程度上影响了 JMASS 仿真应用执行的速度。其中，JMASS 的引擎（体系结构）所占用的开销较小，运行时间主要由仿真应用中所包含的模型的数量和分辨率的等级来确定。

JMASS 中的模型可以划分为数字系统模型（Digital System Model, DSM）、环境模型和辅助模型。其中，数字系统模型一般又分为友军（蓝军）模型和敌军（红军）威胁模型。敌军威胁模型由相关的情报中心来开发和进行有效性验证，它们在 JMASS 系统中一般都是即插即用的，不需要开发额外的代码。同时，HLA 提供了一种机制可以实现这些敌方威胁模型同其他基于 JMASS 的仿真应用或一些非 JMASS 的仿真应用进行互操作。

JMASS 模型中的环境模型实现了仿真过程中环境建模，它主要针对仿真应用中所涉及的具体传感器感兴趣的环境。目前，JMASS 具有一个射频（RF）领域的环境模型，主要用来处理雷达导引的武器系统和传感器，在 JMASS 的总体运行设计目标（FOC）中还包含针对红外和水下领域的环境模型。

其他的辅助模型包括 SpatialInfoPlayer 和 SpatialObserver，它们主要用来为仿真应用提供一些辅助的功能和支撑信息。它们并不表示任何物理实体，主要用来辅助仿真分析。其中 SpatialObserver 用来计算两个 Player 之间的最接近点（Point of Closest Approach, PCA），它对两个相关的空间实体的状态进行监视，并最终计算出它们的 PCA 值。由于 SpatialObserver 是不断进行动态地调度针对每一对空间实体的下一次观察，因此，在实体逐渐接近的同时，就可以提高它们模型的分辨率。SpatialInfoPlayer 用来生成 SimView 的输出文件，它从 SimView 中抽取与具体的空间对象有关的数据，并把它们保存到扩展名为.sv 的文件中，这一文件可以被 SimView 用来在三维的空间进行显示。

JMASS 模块化的面向对象的仿真环境（JMOOSE）为 JMASS 仿真应用中的射频环境下的模型所广泛使用，提供了信号的表示和调制过程，可以用来模拟实现 100MHz~100GHz 范围的短波内相关的射频工作现象。JMASS 中事件时间管理概念是针对脉冲系统设计的，如雷达、射频搜索器、射频电子对抗设备以及敌军或友军的识别系统等，但也运行对连续波（CW）系统进行仿真。JMOOSE 与 JMASS 的接口是简单、可靠的。同时，对于需要和射频环境进行交互的系统也是必需的，其中包括那些具有射频反射面，并能够被射频电子传感器探测到的武器系统。

2.3.6 JMASS 通过 HLA 实现互操作

目前支持分布式仿真流行的标准是 HLA，HLA 设计用来使分布于某个网络的各种仿真能互操作。由于 JMASS 提供了一个 JMASS-HLA 框架，通过这个框架，JMASS 仿真可与其他仿真实现互操作，如图 2.13 所示。

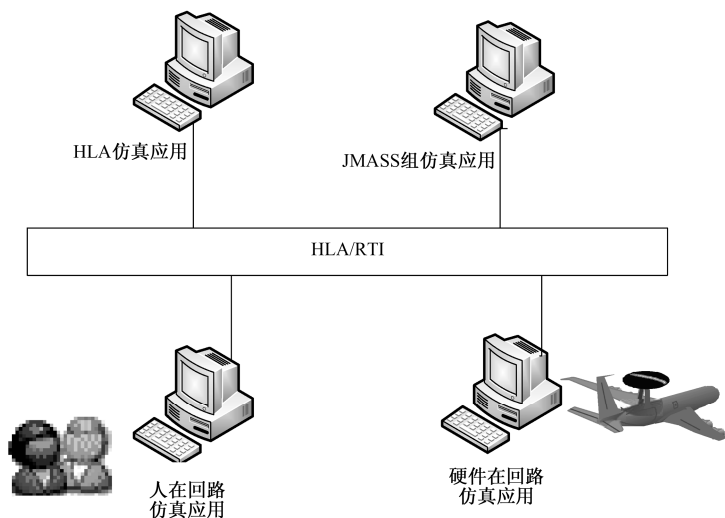


图 2.13 JMASS 作为一个盟员嵌入 HLA 联邦

其中，无论基于 JMASS 的仿真应用多么庞大，JMASS 通过 HLA 交互时都只能当作一个 Team（组）作为 HLA 中的一个盟员与网络中其他仿真互操作。但是，必要时也可将一个 JMASS 仿真应用设计成两个或多个仿真应用，将 JMASS 集中式的仿真设计成基于 HLA 的分布式仿真。在设计基于 HLA 的 JMASS 分布式仿真应用的过程中，应充分考虑 HLA 和 JMASS 的特点。JMASS 设计用来处理工程级高逼真度的、电子战环境下的武器系统交战的建模与仿真，作战对象之间的交互信息量大、更新频繁，是紧耦合仿真，JMASS 设计 Player 之间通过 Port 采用共享内存机制相互通信，减少了信息交互的延迟时间。而采用 HLA/RTI 框架进行仿真，网络中的信息交互延迟时间相对比较明显，适合于耦合相对松散的对象。因此，在设计大规模分布式电子战环境下的仿真应用时，可充分利用 JMASS 的特点，将实时性要求高、耦合紧密的对象封装在 JMASS 仿真应用中实现，而对信息交互相对松散的部分则采用 HLA/RTI 框架进行交互。必要时采用硬件在回路或实物在回路的仿真，这样才能更好地满足工程应用的需要。

2.4 JWARS 系统

2.4.1 JWARS 系统概况

美军联合作战仿真系统 JWARS (Joint Warfare System) 是一个战役级的军事行动模型。由国防部长办公室主持签约开发。它的用户包括美国国防部长办公室、联合参谋部、后勤部和美军作战司令部。JWARS 为上面用户提供联合作战仿真, 包括作战计划与实施、兵力评估研究、系统采办分析及概念与条令开发。要达到这一目标, 完成对 21 世纪军事行动的分析, 要求该仿真系统提供联合作战的“全面完整的”描述。这种描述将使可视化进入下面的领域:

- 作为美军《作战构想》(US CONOPS) 整体一个组成部分的 C⁴ ISR 系统和过程;
- 在作战过程中, 后勤的影响, 包括战略后勤与战区后勤;
- 战役层次的机动战。这些能力将弥补军事建模经验方法的不足, 也将对未来仿真的核心建模技术作出贡献。

JWARS 系统的能力主要有:

(1) JWARS 是一个专业化水准很高的推演仿真系统。它使用被称为 Smalltalk 的计算机语言、高质量的计算机辅助软件工程 CASE (Computer Aided Software Engineering) 开发完成。它是一个事件驱动的仿真系统, 描述了联合作战频谱 (Joint Spectrum) 上以前未曾达到的战役级的军事力量行为与交互。这种高层次视图包括: 三维战场空间的显式表达; 地形和气象的效果; 后勤对军事力量的制约; 关键信息流的显式表示; 基于感知的指挥与控制。

(2) JWARS 系统的开发包括以前推演系统开发过程中所未曾有过的用户的介入。正在进行的活动包括: 团体用户、个人用户对于系统设计过程的参与和研究小组连续不断地对系统仿真的操作使用。此外, JWARS 开发全程由正规的 V&V 签约人监督, 编写的程序要通过正式的β版和作战测试。

(3) JWARS 在支持美国国防部作战研究与计划制订过程中能够为分析人员提供一个杰出的分析研究工作平台, 这一工作成效(工具)的不足或局限性主要受到或者反映当前军事建模与仿真技术知识的限制。在 JWARS 系统研制开发过程中, 所取得的建模方法与技术的进展将对《美军 2010/2020 联合作战构想》这样的作战原则、文件及相关概念验证发挥重要的作用。

2.4.2 JWARS 系统设计和构件

JWARS 是一个集中于战役层次的“端到端”（End-to-End）的军事行动的推演仿真系统。该系统能够描述军队从港口装载到作战全频谱范围的军事行动。这提供了一个观察战役从“港口到散兵坑”的全战役精细场景的视图，包括战略与战役后勤的潜在影响。

该系统由被集成为一个完整的执行软件包以完成战役研究与分析的三个软件域组成。这三个软件域分别是：问题域、仿真域和平台域。问题域提供用于分析目的、能够描述作战功能的软件；仿真域提供驱动仿真运行的“引擎”，而且也提供三维的战场空间描述；平台域提供 JWARS 硬件及帮助分析员或其他人员获得仿真输入/输出数据的人机交互界面（Human Computer Interface, HCI）。图 2.14 给出了各开发域的概况。

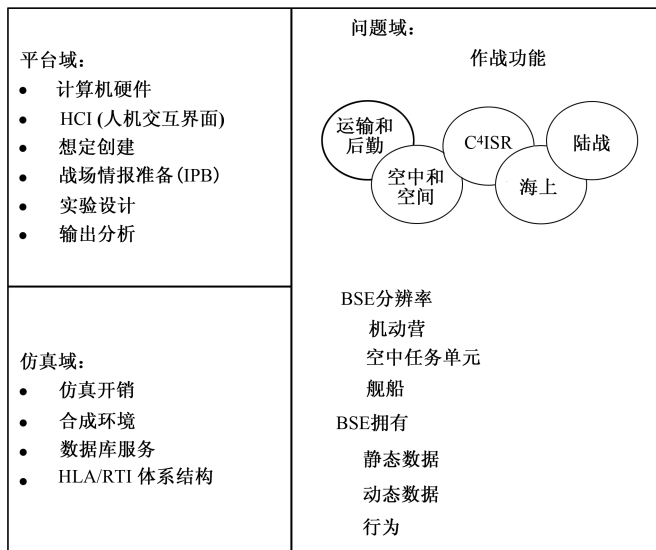


图 2.14 JWARS 域

2.4.3 JWARS 问题域

在 JWARS 系统中，表示军事力量与系统基础构成模块叫做战场空间实体（Battle Space Entity, BSE）。BSE 的陆上演习分队的分辨率是营，空战是飞行编队，海上力量是舰船，关键情报侦察监视系统是单个平台（如 JSTARS 和 U2s）。此外，也有一些特殊的 BSE，如港口、机场、主要指挥部门（如师司令部）。BSE 数据表达了实体的静态与动态属性。静态数据表达了不随时间改变的值，如作战分队的法定编成力量。动态数据（如部队战斗力）能够随着时间的推移而改变。这些数据也指明了 BSE 彼此之间及其

环境之间的交互行为。所有的 BSE 实体都有指挥与控制能力。指挥与控制（C2）的复杂性主要取决于相应 BSE 的特性。图 2.15 描述了战场空间实体的主要组成。

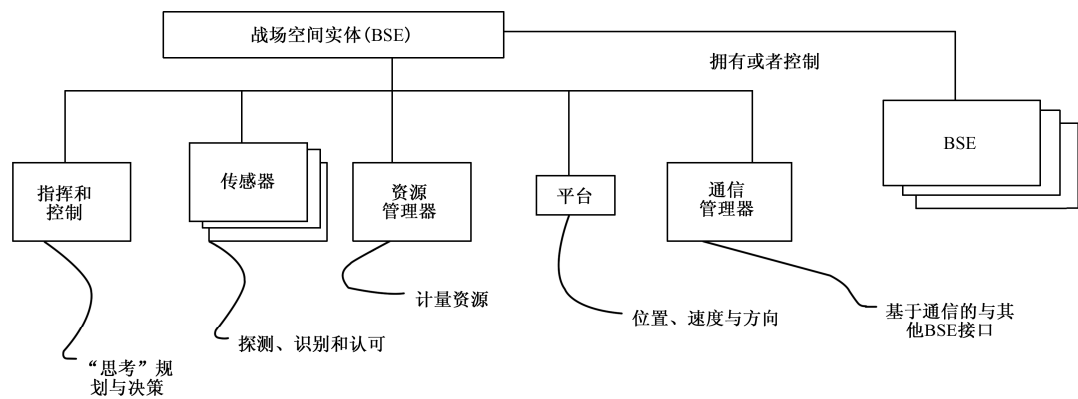


图 2.15 战场空间实体组成

一个 JWARS 想定包括所有参演部队的战场空间实体集，也包括仿真推演过程中战场空间实体的执行计划。JWARS 一个极其重要的贡献是它仿真了部队战前的活动。目前的 JWARS 想定设计时间从真正作战实施前很多天就已开始，包括部队从驻地到战区的转移行动过程的模拟。从作战上，战役的这一部分被称为“企图立案”。以前的战役层次模拟对于这一训练课题常常以一组基于“离线分析”的假设形式出现，并把它作为战役模型作战模拟运行的起始条件。

在 JWARS 系统模拟过程中，各个 BSE 的交互（例如感知、战斗损耗）是一组类型各异的算法来操作、裁定完成的。这些算法由领域专家提供给 JWARS 系统或需要时由系统自身生成。算法的特性与分辨率主要取决于以下几点：所建模型的活动类型；与此算法相关的模型功能；仿真想定中数据的易采集性。图 2.16 概略描述了算法类型与它们相关联的交互之间的相互关系。

内概率过程		很多实体	↔	实体较少
Monte Carlo		-----		
评估 随机数： 随机的		离散输出 ISR传感器 空地打击 空战裁决 海雷裁决 潜艇行动 海军空空交战		
非Monte Carlo评估 非随机数 确定的		离散输出 间接火力打击 计划综合 情报融合 小数输出 间接火力地面战损 间接地面战损 空地战损		
内确定过程		离散输出 部署计划 机动 实体对实体 空战命令 行动方案分析		

图 2.16 JWARS 算法

2.4.4 JWARS 仿真域

JWARS 系统仿真域提供了仿真系统能够正常运行的全部资源开销。这些资源包括事件表、随机数发生器、坐标系统合数据收集代理等这些必须的基础设施。这些资源也包括系统管理器一类的资源，如图 2.17 所示，它们是开发 JWARS 问题域功能模块的软件工程师实现的面向对象的程序编码。

管理器	功能
空间管理器	地理空间过滤器以最大程度地减少战场空间交互
运动管理器	控制BSE的运动
交互管理器	当BSE“看见”对方时告知BSE
环境管理器	告知各个BSE，它所处的物理环境
裁决管理器	评估交战结果
事件管理器	管理时间与活动
数据收集器	在仿真运行期间收集数据
仿真管理器	将所有组件捆绑以共同完成一项仿真

图 2.17 仿真域管理器

这种设计模式提供了系统模块化的结构，使 JWARS 系统实现新的构想时变得相对容易。Smalltalk 开发环境也使得多处理机分布并行的计算需求能够较好地实现，同时也使得 JWARS 有能力从分布计算技术突飞猛进的发展过程中轻松获益。

JWARS 仿真域也提供了 BSE 运行的合成自然环境。这个战场空间映射到 WSG-84 地理标准椭球体上，使用全球坐标系。这种表示形式能使 JWARS 系统中全部实体的位置是全球一致的。此外，仿真系统使用环境数据，如地形、天候、机动网络、海洋探测学等影响军队作战、保障分队与系统的作战效能。这种环境影响战场空间实体（BSE）间交互。建模考虑到的环境特性包括：可视性、海洋状态、地形粗糙度。在一个 60 天的演习想定中，JEARS 系统将查询成千上万次环境管理器以了解相关环境信息。地形数据是从美国国家图形图像局获得的标准地形数据，并采用压缩的地形数据库格式存储。它使用 ERDC Vicksburg 开发的算法在用户定义的机动单位网格处理地形数据，并进入整个机动网络，以此支持战役层次战区之间精确的机动过程的描述。天候数据源自美国国防部建模仿真办公室（DMSO）的环境想定发生器。

JWARS 作战需求文档突出对输入 / 输出数据的跟踪需求。满足这一需求必然要求有一个健壮的数据管理系统。JWARS Release1.1 版本使用 ORACLE8 作为数据库引擎满足这些要求：输入 / 输出数据都以 ORACLE 形式存储。大部分数据都是二进制数，要求

JWARS 人机界面 (HCI) 对其进行可视化管理。然后 HCI 提供工具与控件去满足完成指定的跟踪需求。

2.4.5 JWARS 平台域

JWARS 平台域包括仿真系统运行的硬件、用户控制仿真系统与之交互的人机界面 (HCI)。HCI 被用于支持想定创建、战场情报准备、运行控制与输出分析。通过使用 HCI 与仿真系统交互, 绝大多数分析需求能够得到满足。

JWARS 是用 IBM Smalltalk 开发完成的。Smalltalk 生成一个“虚拟机”, 使计算机程序代码能都主动适应主机环境。这样就极大地减少了为使软件适应专用的硬件环境配置所必需的开发工作量。JWARS 当前发行版本运行使用客户/服务器体系结构。服务器端仿真运行在 UNIX 环境下。JWARS 允许多个用户同时建立与运行仿真系统。专用硬件需求依赖于用户站点需求, 正在协调作为野战演习过程的一部分。

HCI 设计建立在 RAND 公司“分析员 workflow”研究成果的基础上。系统也包括限制用户修改 JWARS 的安全特性。JWARS 系统最常见的一个用户——分析员, 有能力创建和修改想定, 说明仿真运行参数, 并且对 JWARS 输出结果给出分析。建模人员有更大的灵活性, 他们能够创建新的实体, 并且修改现有实体的结构。开发人员能够对整个系统进行调整、改变。站点管理员享有与其单个 JWARS 用户相一致特权的局部控制能力。

JWARS 使用由仿真域提供的设备收集数据。JWARS 用户能够通过 HCI 选择他们希望收集的数据。在仿真执行期间, 数据通过 ORACLE 数据库收集与存储。在仿真运行后, 分析员能够使用 JWARS 本身提供的分析工具使仿真结果可视化。此外, 任何数据收集设备能够作为解除限制文件的形式被输出, 作为商业离架 (Commercial Off The Shelf, COTS) 分析工具使用。在最初 JWARS 测试期间, 参加测试的分析员开发了许多“本人专用”的可视化数据工具。

2.5 STOW 系统

2.5.1 STOW 系统研制背景

美军战争综合演练场 (Synthetic Theater of War, STOW) 仿真系统是由美国国防部高级研究计划署 (Defense Advanced Research Projects Agency) 主持研制的先期概念技术示范项目 (Advanced Concept Technology Demonstration Program, ACTD), 该项目的研

制始于 20 世纪 90 年代（1994 年），终于 20 世纪 90 年代末（1999 年 10 月）。STOW 仿真系统是美军具有里程碑意义的综合演练仿真系统，仿真实体数最高可达 50000 个，系统开发的许多创新技术至今仍在美军一些大型联合仿真系统或仿真标准中普遍使用，如 WARSIM2000，JSIMS，HLA 和 CMMS 等。

美军认为，随着国家财政预算的缩减，美军面临重大威胁环境的变化以及技术发展速度的加快，已经很强烈地挑战着美军实时应对各种变化无常的危机形势的能力。此外，军事技术的全球性扩散，导致美国潜在敌人相对容易地获取这些技术，也进一步加速了美军对于新技术从开发到使用之间快速转换的需要。综合这几方面的原因，要求美军必须进行而且要不断加速开展先期技术示范项目的研究，以促使已经或正待成熟且具有潜在军事应用前景的新技术向增强或提高美军作战能力的转化。

美军的先期概念技术示范项目主要强调技术评价与集成，而不是技术开发。它的目标是为军方人员提供一个新技术的原型实验能力，以对该能力做出符合实际的评估。作战人员在一个实际的军事演习中评估这种能力。这样，在某种意义上，也足以全面地、客观地评估出该能力的实际效用与军事价值。

先期概念技术示范项目被设计成为许可用户在没有实际经验的背景下获得对于建议的新技术能力的理解。特别地，它们能为军方人员（作战者）提供以下机会：在评估过程中，发展和完善他的行动构想，以更充分、完全地开发新技术的应用能力，并且当他获得了对于这种能力的经验与理解之后，能够进一步补充和扩展他的作战需求，尔后再在实际军事示范演练活动中，如同实战一样操作众多原型系统，从而对于所示范的技术军事效用与能力进行一个完整评价。

在先期概念技术示范项目结束时，一般有以下三种结果：

- 所示范的新技术或项目有价值，用户或发起人推荐对于新的技术或项目的采办与使用；
- 所示范的新技术或项目根本没有应用价值，该项目就将被终止；
- 所示范的新技术或项目完全满足要求，该项目没有必要继续实验，转向实用系统的开发。

2.5.2 STOW 仿真系统构想与能力

美军的 STOW 先期技术示范项目将示范论证合成战场空间的使用，以支持基于实体层次的平台表达与交互的联合训练与任务重演。STOW 示范项目的目标是扩展和集成核心仿真技术，包括合成兵力、合成环境及实时网络互连和信息传输等技术。后期目标的进展还包括 C2 结点（CFOR，指挥兵力）的计算机表达，合成环境中气象、天气、海况与动态地形的结合，支持大规模演习的多播软件与硬件以及快速的加密设备。此外，还有以下附加目标：将作战 C4I 系统连接到 STOW 系统高级演习控制、事后重演

与分析工具,以减少使用仿真系统的额外负担。STOW 系统还被用做 HLA 和 CMMS 的早期原型。

不难看出,美军的 STOW 仿真系统研制构想主要包含以下四大基本构件:实体层次的计算机生成兵力,交互式合成自然环境;可拓展、安全的仿真网络;人在回路,作战者经由 C4I 界面直接与系统发生交互。

从技术视角,包含以上构件的 STOW 仿真系统必然跨越以下六大领域:合成兵力;合成环境;高级仿真网;仿真基础结构;C4I 界面;事后讲评系统。

合成兵力是一种能够完全集成到联合合成战场空间、行为精确、智能、自治的计算机生成兵力。合成兵力的基本组成包括:

- 行为逼真的平台(坦克、舰船、飞机),具体描述至陆军部队重装旅、海军航母战斗群、空军固定翼/旋转翼飞机、对手兵力、海军远征军、未来系统、平台等;
- 综合环境效果(地形、烟雾、灯光效果);
- 逼真的传感器性能;
- 合成的指挥兵力实体;
- 基于对象的体系结构/模块化设计。

合成环境特性包括:

- 多分辨率地形与海洋数据库;
- 战术层次具有重要作用的环境效果;
- 多状态实体(目标);
- 实时气象效果;
- 世界范围地形数据库;
- 修正后的东南亚地形数据库。

高级仿真网络拥有领先优势的仿真网服务,包括两方面内容:对于大规模演习支持带宽的高效率、高效能使用,如 IP ATM 端到端多播与高质量服务、在一个实时分布仿真中可支持高达 50000 个作战实体、动态网络资源管理等;高速 ATM 网络加密等。

仿真管理基础结构允许多个地理上分散的、现场虚拟推演仿真活动在一个共同的合成战场空间进行交互,如图 2.18 所示,包括以下方面:

- 大规模与 HLA 兼容的仿真结构;
- 对现场、虚拟、推演、仿真系统进行无缝集成的能力;
- 经由作战想定企图立案系统接入的作战者界面;
- 从战斗人员所在职责岗位接入;
- 支持演习计划与生成、仿真运行、数据收集与事后讲评。

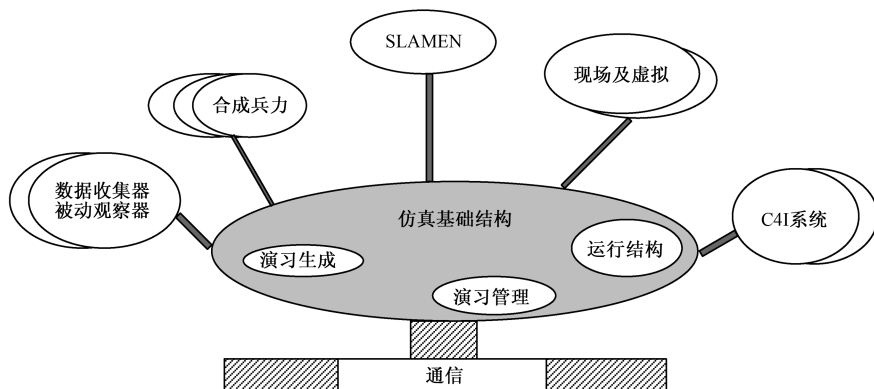


图 2.18 仿真管理基础结构

C4I 界面提供了一个从 STOW 仿真系统到 C4I 系统的一个界面。C4I 界面包括的内容有：指挥与控制；情报收集与分析；战场公共视图；任务计划；仿真控制。

事后讲评系统对于事件数据的查询、分析、表现提供了一个增强的工具与手段，具体内容包括：

- 在二维地图上关键事件的重演（比实时快）；
- 在三维地图上关键事件的重演（实时）；
- 杀手/牺牲者比分、战损率、运动速率等军事性能数据的统计；
- 专门效能/性能测度数据回放。

STOW 仿真系统拥有以下能力：

- 兵力与传感器离散的、权威的模型；
- 动态的、交互的环境；
- 可重组、可扩展的体系结构；
- 二维、三维地形数据的可视化；
- 分布的高速仿真网络；
- C4I 界面；
- 人在回路（MITL）；
- HLA/RTI 兼容；
- 快速建立新系统、概念、行动构想、训练计划与作战条令模型的能力，并能将以上能力集成到联合合成战场空间中。

STOW 仿真系统使你能够做到以下方面：

- 在一个现有的联合合成战场空间中建立新系统模型并对其作战效能做出评估；
- 可以使用世界上任何地区的地形数据库，这些数据库包含气象、天候、夜暗等附加信息；

- 人在回路, 评估新的 C4I 过程与装备;
- 使新的构想、条令、战术可视化, 包括二维战场的可视化与三维战场的可视化;
- 使用用户友好的 AAR (事后评讲) 系统, 通过试验收集和评价数据等。

在 20 世纪 90 年代初, 美军认为当时美军的仿真系统存在以下突出问题:

- 系统仿真层次在“聚合级”, 描述的主要作战样式是消耗战;
- 面向单一军种、兵种, 没有考虑联合作战或联军 (多国部队) 作战;
- 重用能力有限, 仅面向特定任务领域;
- 未来作战构想 (概念) 探索困难或代价昂贵。

但是 21 世纪美军对于作战仿真的需求强烈, 并且在许多方面与 20 世纪有重大不同, 主要有:

- 对于非战争行动、精确武器、情报侦察监视实体级的分辨率;
- 面向联合或联盟, 从班组到联合特遣部队的无缝连接;
- 跨越训练、分析、采办所有领域的重用;
- 可重组、可拓展的体系结构;
- 世界范围内的地形环境数据库。

基于以上分析, 美军提出了 STOW 仿真先期概念论证示范项目。从上述介绍的基本结构与能力以及后面介绍的演习结果看, 美军的 STOW 仿真试验取得了巨大的成功, 从而不仅解决了 STOW 系统之前美军仿真设计上所存在的问题, 也基本达到了美军 21 世纪作战仿真需求所要达成的目标, 为美军 HLA/RTI 标准与支撑系统的研制做出了突出贡献。

2.5.3 STOW 仿真系统演习和应用

本节将对美军 STOW 仿真系统的演习、应用情况进行全面介绍。

(1) “大西洋决议 94/STOW-E” 演习

战争综合演练场 (The Synthetic Theater of War, STOW) 是一种综合的集成环境, 是在一项训练/演习或试验场景中对两个或两个以上的现场、虚拟和推演模拟系统的综合集成而形成的演练环境。

STOW-A (Synthetic Theater of War -Architecture, 战争综合演练场-体系结构) 是由以下硬件和软件一体化而形成的一套组件: 该组件用于建立与支持现场、虚拟和推演环境之间的连接, 该环境“要求”支持未来原型开发、概念与装备的研究与测试、任务推演与训练……并与 C4I 系统进行连接。

STOW-欧洲 (STOW-E) 先期技术示范 (ATD) 项目已连接至“大西洋决议 94”演练环境中并实际运行使用。STOW-E 展示了 DIS 作为先期概念示范技术进行试验的优

点, 试验表明, DIS 能够将现场、虚拟和推演训练系统互连而形成为一个一体化的仿真模拟环境。

(2) “草原勇士 95/STOW” 演习

“草原勇士 95/STOW” 演习是一个使用美国国家模拟中心作为作战网络中心的全球范围内的分布式演习。这场演习完善了在 STOW-E 中开发的虚拟、推演模拟系统的连接, 共连接了 4 个虚拟站点。来自德国格拉芬沃尔、美国肯塔基州诺克斯堡和乔治亚州本宁堡的 SIMNET 部队参加了演习。阿拉巴马州诺克斯堡的 AIRNET 提供了攻击直升机仿真器。

(3) “STOW 演习 96/STOWEX” 演习

“STOW 演习 96/STOWEX” 演习使用了 100 个虚拟推演连接站点, 使一支列入 TO&E (编制与装备表) 的部队能够在最小的外部承包商的支持下进行一场成功的 STOW 演习。一个 STOW-A 网络中心已经在美国国家模拟中心 (NSC) 建成, 而远程站点分别设立在美国本宁堡、诺克斯堡、瑞勒堡和鲁克尔堡。

(4) “战马 97/STOW” 演习

STOW-A 网络中心功能于 1997 年在韩国凯西营地的第 2 步兵师投入使用, 并被用于支持“战马 97/STOW” 演习——在虚拟、推演环境下有实兵参与的、人工连接至现场训练的旅级别的演习。此外, 还有一个 STOW-A 网络中心在美国诺克斯堡被建成开通。

“战马 97/STOW” 演习示范的目标包括: STOW 系统对每场演习需实时支持 10000~15000 个实体的仿真运行, 并能将指挥兵力 (CFOR) 扩展至各个军种部队的营或相当于营级别的层次, 为旋转翼和固定翼飞机、舰船和单兵开发智能合成兵力平台, 实现对于合成环境数据库的标准化表达, 优化大部分地理区域三角形非规则网格的地理表达, 为 ATM 网络与动态多播软件与硬件论证关键、敏捷的加密系统, 以支持数以千计的多播分组, 并且示范开发原型想定生成和分布式演习控制技术。

“战马 97/STOW” 演习示范预期的收效包括:

- 新的任务重演与联合特遣部队训练能力;
- STOW 合成战场空间与真实世界 C4I 系统之间操作界面的实现;
- 通过连和营级别合成指挥实体及新的演习生成与初始化技术的使用大大减少了所要求演习保障人员等。

2.6 发展趋势

战术通信仿真在武器系统论证、方案选择、研制、试验、鉴定、改进提高以及部队维护保养和训练中的应用, 已得到研制方和使用部队的认可和重视。它可提高新一代武

器装备综合性能,减少系统实物试验次数,缩短研制周期,节省研制经费,提高维护水平,延长寿命周期,强化部队训练等。据国外统计,仿真技术可缩短 20%~40%的武器装备研制周期,节约设备定型所需试验的 10%~30%、系统联调时间的 40%~60%。从外军的军事仿真发展来看,其技术发展趋势呈现如下趋势:

(1) 从基于 HLA 体系架构向基于网络的分布式仿真方向发展

随着仿真技术的发展,仿真应用越来越广泛,为了集成不同类型的仿真应用,提高仿真应用的互操作性和仿真部件及模型的可重用性,美国国防部建模和仿真办公室在 1995 年 3 月提出了一个全新的仿真技术框架 HLA (High Level Architecture),并于 1996 年 9 月正式颁布 HLA 标准。1997 年 12 月,HLA1.3 被仿真互操作标准化委员会 SISC (Simulation Interoperability Standards Committee) 接纳为 IEEE 标准草案,并在 2000 年 9 月被正式接受为 IEEE1516 标准。美国军方也决定在 1999 年之后不再资助非 HLA 的仿真研究;2001 年之后全面终止使用与 HLA 不相容的仿真工程。

随着网格计算技术的出现和快速发展,网格与仿真的结合成为网络化建模与分布式仿真技术发展的新趋势。美国用于军事复杂系统仿真研究与应用的 SF Express 项目、欧洲用于外科手术的交互式仿真和可视化、洪水预备决策支持系统、高能物理的分布式数据分析、天气预报及其中的空气污染分析的 Cross Grid 项目,英国伯明汉大学、诺丁汉大学和新加坡南洋技术大学的协作项目等基于网络的仿真项目。

网格计算技术的核心是解决网上各种资源(如计算资源,存储资源,软件资源,数据资源等)的动态共享与协同应用。它以崭新的理念和方法为仿真领域中诸多挑战性难题的解决提供了技术支撑,如:仿真应用的协同开发,仿真运行的协调、安全和容错,模型和服务的发现机制,新的资源管理机制,资源监控和负载平衡等,解决 HLA 无法解决的许多难题。

(2) 随着对仿真可信要求的提高,仿真建模技术朝向软件工程化方向发展

仿真是基于模型的实验,在建模过程中不可避免会忽略掉一些次要因素和不可观察的因素,且对系统作了一些理论假设和简化处理,因此仿真系统与真实系统输出的一致性程度问题,也就是仿真置信度问题是仿真建模必须解决的问题。

国外早在 20 世纪 60 年代开始对模型的有效性问题进行研究,并在概念和方法性研究方面取得了许多重要成果,美国国防部(DOD)明确提出有必要提高国防部建模与仿真的正确性和仿真结果的可信性,并于 1991 年成立了“国防建模与仿真办公室(DMSO)”负责此项工作,以制定一个关于仿真模型校验、验证和评估(VV&A)的国防部指南。

1996 年,DMSO 建立了一个军用仿真 VV&A 工作技术支持小组,该小组负责起草国防部 VV&A 建议规范(VV&A Recommended Practice Guides),于 1996 年 11 月完成了建议规范的第一版,2000 年公布了第二版,这是目前关于仿真系统的 VV&A 最为全面的工具书。另外,IEEE 也于 1997 年通过了关于分布交互仿真系统 VV&A 的建议标准

IEEE1278-4, 这是关于分布交互仿真系统 VV&A 的一个比较全面的指导。

VV&A 技术与方法是在仿真系统 VV&A 过程中为完成 VV&A 工作各阶段目的而采用的各种技术、工作策略等的总称。仿真系统是融合了建模技术、系统科学、软件工程和其他有关专门领域知识的复杂系统, 因此仿真系统的 VV&A 充分吸收有关领域成功的测试与评估方法。

(3) 由纯计算仿真向半实物仿真的方向发展

半实物仿真技术自 20 世纪 60 年代问世直到目前美国研制航天飞机, 始终盛行不衰。美国人非常重视这方面的研究和应用, 把模拟和仿真技术看作是降低导弹防御和战术导弹武器系统生命周期费用的切实可行的手段, 并且在制导武器系统的开发方面应用模拟和仿真技术已经有很长的历史, 认为系统仿真是武器研制成功的关键。美国大多数主要的航天和国防承包商都有一个或多个半实物仿真试验室。

半实物仿真将单纯模拟或者单纯仿真的方法又提高了一个层次。半实物仿真结合了实物系统模拟和仿真模拟的各自优势, 能够直接将设计的试验算法和协议暴露给真实网络, 直接测试协议的实现而不用通过模拟方法进行重复性的生成, 同时内部模拟环境又具有相当的可控性, 通过这样的模拟仿真环境, 将可以更直观更精确地进行网络软硬件的设计验证与测试。

第3章 分布式半实物仿真技术与方法

仿真技术是以相似原理、信息技术、系统技术及其应用领域有关的专业技术为基础,以计算机和各种物理效应设备及仿真器为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。组成系统仿真的三个要素是系统、模型和计算机,与之相联系的主要活动是建模、模型程序化、仿真实验和分析。仿真实验包括实物仿真实验、半实物仿真实验和数字仿真实验。

系统仿真可以有多种分类方法。按被仿真对象的性质划分,可分为连续系统仿真、离散系统仿真、连续/离散(事件)混合系统仿真和定性系统仿真;按仿真系统的结构、实现方法和手段,可分为物理仿真、计算机仿真、半实物仿真(硬件在回路中的仿真)和人在回路中的仿真;按照仿真实验的组织方式划分,可分为单机仿真、并行仿真和分布式仿真等。为了满足战术实验应用的需要,通常需要采用多种仿真技术建立综合性仿真系统,本章介绍分布式半实物仿真实现的原理、体系结构、主要技术和方法。

3.1 概 述

仿真技术综合了当代科学技术中多种现代化尖端手段,极大地扩展了人类的视野、时限和能力,在科学技术领域起到了极其重要的作用。随着网络结构和规模越来越复杂化以及网络的应用越来越多种多样化,单纯地依靠经验进行网络的规划和设计、网络设备的研发以及网络协议的开发,已经不能适应网络的发展。因而急需一种科学的手段来反映和预测网络的性能,网络仿真技术应运而生。网络仿真是在计算机中构造虚拟的环境来反映现实的网络环境,通过数学方法或者动态蒙特卡罗方法来模拟现实中的网络行为,从而可以有效提高网络规划和设计的可靠性和准确性,降低网络投资风险和开发风险,减少不必要的投资浪费。

美军在系统仿真方面的研究已进入综合仿真和应用阶段,建立了系统的建模与仿真体系结构、技术体制和标准,如 MSMP、HLA、SEAMLSS 和 JTA 中的相关文件内容。其趋势是由单机(多 CPU 并行)仿真向采用 HLA 的分布式系统仿真方向发展,通过 HLA 为所有异类仿真提供一个通用的体系结构和交互标准。著名的仿真软件 OPNET 参与开发了众多的网络中心战项目,如 JTRS (Joint Tactical Radio System: 联合战术无线

电系统), FCS (Future Combat Systems: 未来战斗系统), NETWARS (Network Warfare Simulation: 网络战仿真) 等。OPNET 提供了 HLA 模块来支持 HLA 接口。OPNET HLA 接口支持 HLA 接口规范的大部分子集, 它提供了必要的机制使不同的联邦成员之间能共享公共对象表示、交换消息(交互)和维护正确的时间同步等。

美海军建模与仿真办公室建设的网络战仿真平台(NETWARS)将通信网络建模与系统仿真相整合, 建立了基于系统仿真的评估和规划体系。NETWARS 的优势在于其提供的可重用和具有互操作性的建模环境。NETWARS 用于联合作战层次上的通信系统建模与仿真, 支持上千个节点, 其中的通信模型使用 OPNET 软件开发。“SEAMLSS 仿真计划”, 是由 DARPA 资助、SAIC 国防工作组基于 HLA 提出的一种自适应大型移动系统的仿真评估系统, 可实现多种战术无线网络仿真系统的融合和联合仿真。它的最初目的是建立 GloMo 技术的早期测试与评估仿真系统, 以验证新的通信装备概念和技术, 包括新的通信协议、体系结构等。SEAMLSS 提供了一个综合的仿真环境, 并对大型 GloMo 系统在真实作战环境及紧急突发事件情况下进行了仿真分析。

我军仿真技术虽然起步较晚, 但发展迅猛。科学技术的发展加快了战术通信装备的更新速度, 也对战术通信仿真提出了越来越高的需求。战术通信系统仿真已不再是简单功能的单一计算机仿真。为了满足战术通信系统建设中从前期方案论证、系统研制、系统测试全过程中仿真验证与优化的需要, 战术通信仿真逐步向分布式半实物仿真的综合性仿真方向发展。

3.1.1 半实物仿真技术

半实物仿真又称为硬件在回路仿真(Hardware-in-the-loop, 简称 HITL), 是一种在仿真系统中接入实物, 以取代部分数学模型的仿真, 可以减少仿真建模的难度, 将系统中不易建模的部分以实物形式代替加入仿真实验。它通过联网技术将各仿真机连接在一起, 以保证节点之间的数据传递。整个系统中既包含实际系统, 也有计算机仿真系统。仿真系统也能作为实际系统的延伸和扩展, 可更有效地研究其性能, 为实际设备大规模应用奠定基础。

半实物仿真系统的优点在于:

(1) 降低建模难度。实际系统中有些子系统的特性很难用数学语言描述或者描述过于复杂, 即使建立了相应的模型, 也会引入较大的误差, 进而影响仿真的精度。在半实物仿真中, 这一部分以实物直接参与仿真, 从而可以降低建模的难度, 克服建模不准确造成的误差。

(2) 可以更有效地研究和确定网络体系结构、通信协议的性能及路由算法、网络重构等多约束多关联性问题。

(3) 可以灵活地改变激励数据或初始条件, 对系统进行多种功能、多种模式的测试。

半实物仿真技术自 20 世纪 60 年代问世之后始终盛行不衰。美国人非常重视这方面的研究和应用,把模拟和仿真技术看作是提高武器系统生命周期的可行的手段,认为系统仿真是武器研制成功的关键。目前我国已经建设了导弹半实物仿真系统、飞机半实物仿真系统、舰艇半实物仿真系统等,这些半实物仿真系统在武器型号研制中发挥了重大作用。

近年来无线自组织网络的兴起,将半实物仿真技术和无线自组织网络技术相结合成为新的研究热点。目前利用半实物仿真技术进行无线自组织网络仿真已经有一定的研究成果,其中比较有代表性的是 MobiEmu。MobiEmu 是一个能够测试和分析真实自组织网协议和应用的半实物仿真网络,它使用一个由 n 台 Linux 计算机组成的实验网模拟一个有 n 个节点的自组织网,并动态安装或拆卸报文滤波器模拟变化的网络环境。每台计算机通过局域网(以太网或是无线局域网)与实验网中的其他所有计算机连接。该系统提供了灵活的控制和方便的可视化功能,易于测试和研究自组织网的动态行为。但由于每个模拟的自组织网节点需要与一台计算机相对应,仿真网络的规模受到限制。同时,系统没有对物理层和 MAC 层进行仿真模拟,实际用途极为有限。直到 2005 年,美国 HRL 实验室提出了一种新的无线自组织网络半实物仿真模拟系统 WiNE(Wireless Network Emulation System),该系统开发了第一个综合的嵌入式分布式仿真引擎,实现了图形化的用户界面,开发了较详细的网络流量、移动性、网络环境等模型,后续工作是继续开发支持 HLA 的改进平台以及新的模拟模型。但是该系统所实现的模型中还是缺少无线自组织网络中的一些重要模型,包括无线信道传播模型,MAC 模型和电台模型等。我国在这方面起步较晚,在某些方面达到了国际先进水平,但总的技术水平,特别是应用水平与发达国家比较还有一定的差距。而网络系统的半实物仿真研究才开始起步,在目前网络仿真系统中的半实物仿真基本都是基于仿真软件的外部接口实现,不利于规模的扩展。我国半实物仿真采取的主要技术途径是采用 HLA 架构,基于分布式仿真实现半实物仿真,系统的实物部分和虚拟部分通过分布式仿真引擎连接,信息在应用程序、物理设备、协议执行单元以及相应的仿真组件之间交互,通过可扩展的分布式接口,可以提供更大规模的将虚拟仿真/实物集成在一起的综合环境,以便于更好地综合其他网络和相关技术,有效地提高系统的可扩展性和可移植性。

3.1.2 分布式仿真技术

1. 分布式仿真技术的发展历程

随着互联网技术的不断发展,单机仿真逐渐转变为网络化的仿真系统。1983 年由美国国防部高级研究计划局和美国陆军共同制定的 SIMNET(Simulation Networking)计划率先提出了分布交互仿真的概念,并成功地将分布在德国和美国的十一个仿真基地约

260 个地面车辆仿真器、飞机飞行模拟器、指挥中心和数据处理设备用计算机网络联接起来,进行各种复杂任务的训练,演示、验证实时联网的“人在回路”的作战仿真和作战演习。SIMNET 的成功极大地促进了分布交互仿真技术在军、民用领域的广泛应用,到 20 世纪 80 年代中期,为了满足分布仿真的迫切要求,美国国防部提出了先进分布仿真(ADS, Advanced Distributed Simulation)技术的概念。

先进分布仿真技术采用一致的协议、标准,通过网络技术将分散在各地的各类仿真设备联接起来,构成时空一致的可交互作用的合成仿真环境。在先进分布仿真领域中,仿真应用分为三类:实况仿真、虚拟仿真、构造仿真。其中实况仿真一般是指在仿真系统中包含真实的系统或设备;虚拟仿真是指仿真系统中含有各类仿真器、仿真设备或平台级的计算机兵力生成(CGF: Computer Generated Forces)模型;而构造仿真与前两类仿真的主要差别在于构造仿真中实体模型的粒度更大(如由 CGF 或聚合级模型组成),而实时性要求较低。纵观 ADS 的发展历程,按照协议划分,以 SIMNET 为起点,先进分布仿真技术先后经历了分布交互仿真(DIS)阶段、聚合级仿真(Aggregate Level Simulation Protocol, ALSP)阶段和高层体系结构(HLA)阶段。

DIS 是在 SIMNET 的基础上发展的分布式仿真技术,是 SIMNET 技术的标准化和扩展。DIS 的核心是建立了一个通用的数据交换环境,通过协议数据单元的使用,支持异地分布的真实、虚拟和构造的平台级仿真之间的互操作。

在 DIS 发展的同时,DARPA 发起了一个聚合级分布式作战仿真的实验,提出了聚合级仿真协议,ALSP 的目标是使现有的多个聚合级作战仿真应用可以通过局域网或广域网交互。

SIMNET、DIS 和 ALSP 都是同类功能仿真应用的互联,只有有限的互操作性,不能满足越来越复杂的作战仿真需求。为此,美国国防部于 1995 年发布了建模与仿真主计划,决定在国防部范围内建立一个通用的仿真技术框架来保证国防部范围内的各种仿真应用之间的互操作性。技术框架的核心是高层体系结构(High Level Architecture, HLA)。HLA 在 1996 年 8 月完成基础定义,随后为北约各国采纳,并于 2000 年 9 月被 IEEE 接受为标准。美国国防部规定 2001 年后所有国防部门的仿真必须与 HLA 相容。

2. 基于 HLA 的分布交互仿真技术

近年来,随着计算机技术、信息技术和系统技术的飞速发展,计算机仿真的应用领域不断拓宽,军事需求的强大推动,促使计算机仿真在理论和实践上都快速发展。随着仿真领域的拓宽,需要解决的问题也越来越复杂,许多问题靠单个仿真系统已无法解决,必须依靠多个仿真系统进行联合协同仿真,因此,分布仿真已成为计算机仿真领域的前沿和热点之一。

分布交互仿真是指采用协调一致的结构、标准、协议和数据库,通过局域网或广域网,将分散在各地的仿真设备互联,形成可参与的综合性仿真环境。分布交互仿真技术

主要解决两个问题：一是支撑大规模复杂系统的仿真；二是降低费用。为此，美国国防建模与仿真办公室提出了建模/仿真的高层体系结构 HLA，HLA 用于解决仿真系统的集成问题，为构造大规模仿真应用提供了一种应用集成方法。目前，HLA 已被正式接受为 IEEE 建模与仿真标准（IEEE1516.X 系列），成为新一代分布式半实物仿真体系结构的标准。

分布仿真技术作为仿真技术的最新发展成果，它在体系架构上，建立了在一个广泛的应用领域内分布在不同地域上的各种仿真系统实现互操作和重用的框架及规范。

高层体系结构（HLA）是一个使得仿真重用和相互交互更为容易的通用结构体系，使得各种不同类型的仿真系统可以通过网络交互，根据需要，其中的一些仿真系统的属性和对象可以通过特殊 HLA 交互文件通知其他参与者，并向网络发布。通过 HLA 函数库，可以实现特殊仿真与其他仿真的运行时间交互控制。在 HLA 中，联邦（Federation）是指用于达到某一特定仿真目的的分布仿真系统，它由若干个相互作用的联邦成员（Federate，或简称成员）构成，如图 3.1 所示。

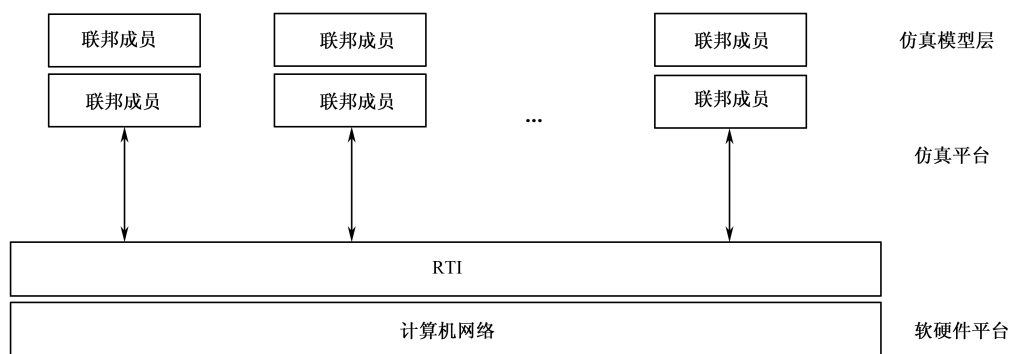


图 3.1 HLA 组成结构

联邦成员最主要的一种成员是仿真成员（Simulation），仿真成员使用实体的模型来产生联邦中某一实体的动态行为，其他成员还包括数据处理、控制等。成员由若干互相作用的对象构成，对象是成员的基本元素。一组对象被选择来构成成员是为了完成联邦运行的某一功能，如记录数据，仿真某个实体（飞机、坦克）的动态行为等。

（1）HLA 的特点与作用

HLA 通过提供通用的、相对独立的支撑服务程序（RTI），将应用层与底层支撑环境分离，隐蔽了各自的实现细节，可以使这两部分相对独立的开发，最大程度地利用各自领域的最新技术。同时，可实现应用系统的即插即用，并针对不同的用户需求和不同的应用目的，实现联邦快速、灵活的组合和重配置，保证了联邦范围内的互操作和重用。

HLA 重点解决两个关键问题:

- 促进仿真系统之间的互操作;
- 利于仿真模型在不同的仿真应用的重用。

(2) HLA 的主要内容和概念组成

① 对象模型模板 (Object Model Templates, OMT)

OMT 是对仿真中的对象、对象属性和对象间信息交互的格式和内容进行定义的标准描述, HLA 定义了 SOM (Simulation Object Model) 仿真对象模型和 FOM (Federation Object Model) 联邦对象模型。

SOM 是单一仿真应用中的对象模型, 它描述了仿真中所有对象的属性和关系 (如从属关系), 即描述了单一仿真所具有的能力, 从而为仿真开发者提供了一种判断此仿真是否适合整体仿真任务需求的方便、快速、标准的方法。

FOM 是对仿真间所有共享信息的描述, 包括被共享的对象、属性和交互作用。

SOM/FOM 是一种建模的技术和方法, 它便于模型的建立、修改、生成与管理, 便于对已开发的仿真资源的再利用, 使建模过程走向标准化。

② 运行时间支撑结构 (Runtime Infrastructure, RTI)

RTI 按照 HLA 的接口规范进行开发, 目的是提供一系列用于仿真互连的服务, 主要作用是进行分层管理控制、实现分布仿真可扩充性的支撑基础, 也是进行 HLA 其他关键技术研究立足点。

如果说 HLA 是建模与仿真技术框架的核心, 那么 RTI 则是核心中的核心, 建立联邦成员必须以 RTI 为其支撑软件, 仿真过程中需要交互的各种信息都要通过 RTI 来完成。

以 DMSO RTI1.3v6 为例, RTI 的组成部件包括 RTI 执行进程 (RTIExec)、联邦执行进程 (FedExec) 以及 libRTI 库等。其中 RTIExec 负责管理联邦执行的创建与析构, 每一个联邦执行都有一独立的 FedExec 进行标识; FedExec 管理该联邦中各成员的加入和退出; libRTI 库将 RTI 的服务扩展给联邦成员的开发人员, 该成员与其他成员的信息交互就是通过调用 libRTI 库的成员函数来实现的。

在 RTI 所提供的服务中, 主要包括以下六个方面的内容:

- 联邦管理: 包含联邦的创建、成员的加入、联邦范围内的同步、保存和恢复、成员的退出及联邦的删除等;
- 声明管理: 完成对成员所需要的属性类和交互类的公布和订购, 以及一些所支持的控制函数;
- 对象管理: 对信息的提供方而言, 包括对象类的注册及其属性的更新以及交互类信息的发送; 对于接收方来说, 包括对象实例的发现和属性信息的接收以及交互类信息的接收;
- 所有权管理: RTI 用来实现在一定的约束条件下, 对于对象属性的更新以及对

象实例的删除等任务让不同的成员来共享;

- 时间管理: 实现时间管理的策略和协调时间的推进, 成员的时间管理策略有控制 (regulating)、受限 (constrained)、既控制又受限 (regulating and constrained) 以及既不控制也不受限 (neither regulating nor constrained) 四种;
- 数据分发管理: 提供灵活的、可扩展的数据公布、订购及交换机制, 使信息交互的效率更高。

③ HLA 相容性规则 (HLA Compliance Rules)

相容性规则给出了使仿真纳入 HLA 中所必须遵守的一些规则。规则分为联邦 (Federation) 规则和联邦成员 (Federate) 规则两部分。

联邦规则主要概括为: 每一个联邦必须具有一个 FOM 来描述对象间的交互; 所有 FOM 所描述的交互作用必须由 RTI 来实现; 所有仿真与 RTI 间的接口必须符合接口规范; 允许对象属性所有权的转换, 但同一对象属性不能同时为多个对象所拥有等。

联邦成员规则主要概括为: 每一个仿真必须具有一个 SOM 来描述对象的属性; 必须具有更新对象属性及发送和接收对象间交互作用的能力; 必须具有接收和传输对象属性所有权的能力; 必须具有根据不同的情况发送不同属性更新信息的能力; 必须具有管理好自己的时钟并与其他仿真的时钟进行协调的能力等。

3.2 分布式半实物仿真体系结构

分布式半实物系统主要实现基于 HLA/RTI 的分布式仿真功能和实物系统接入功能, 半实物仿真可以替代或减少系统的内外场实物联试, 缩短试验周期, 而且又可避免试验场建设的巨额经费开销。分布式半实物仿真系统可以应用在设备级和系统级仿真, 通过把新研制设备及系统 (实物系统) 与仿真系统相结合进行半实物仿真, 测试评估系统的综合性能。

目前国内外半实物网络仿真一般都是基于商用仿真软件的外部接口开发, 如 OPNET 平台的 SITL 就是基于其外部接口 (ESD) 进行开发。以前这些商用仿真软件对中国禁运, 最近才解除禁运允许在中国出售。但是其模块的核心函数基本都进行了封装, 只提供了部分接口供用户使用, 要修改代码或者扩展 STIL 模块的功能则相当困难。基于商用仿真平台的外部接口开发半实物接口虽然可以在其基础上搭建半实物环境, 但是难以满足可扩展性和通用性的需求。

利用分布式仿真技术可以更好地实现互操作性和可重用性, 能够实现虚拟—实物系统的互联, 满足大规模网络仿真分析评估的需要, 而且基于 HLA 的分布式仿真技术是目前仿真技术发展的趋势。高层体系结构 (HLA) 是为满足大规模复杂系统仿真的需求而

制定的一个通用体系结构,支持各类系统仿真,提供通用的数据交换通信协议和通用、开放的数据语义互操作,可以很好地解决仿真软件在协同仿真控制的需要。常用的网络仿真软件都包含了分布式仿真接口,支持方便的接入分布式仿真系统,如果半实物仿真系统支持 HLA 接口的接入,该系统的通用性将得到极大的提升,整个系统可以更方便地接入实物系统、分布式网络仿真系统、视景系统、主控系统等虚—实结合的系统,促进大规模仿真技术的发展。

分布式半实物仿真系统涉及半实物与分布式仿真两个方面,最主要的难题是需要开发一个同时支持分布式仿真与半实物的接口,并同时满足分布式仿真和实物系统的管理与控制要求,而目前国际上大型仿真工具开发商,都没有完全解决此类问题,技术难度较大。通常仿真场景可以采用成熟的商用仿真工具来搭建,半实物仿真接口需要自行开发设计。通过分析实物系统与仿真系统所采用的协议体系、分组格式、路由算法、拓扑结构、系统时间等方面的差异和交互要求,开发专用的半实物系统控制接口来屏蔽这些差异,达到联合仿真的目的。半实物控制接口完成仿真系统与实物系统的接口转换与控制,执行仿真管理与控制的命令,执行仿真时间、事件与信息向实物系统的传递与协调,进行信息格式的转换,与仿真网络交换必要的业务和路由信息,完成双向代理的功能。它一方面对仿真系统提供实物系统的仿真镜像,把实物系统作为仿真系统的一个内部成员,完成与仿真系统一样的功能;另一方面对实物系统提供虚拟网络,使仿真系统所构成的网络对实物系统就像一个真实的网络一样。控制接口还执行必要的数据采集等功能,以采集实物系统的各种性能参数。

实物系统是由实际设备构成的与实际体系一致的实际通信系统,采用设备自带的通信协议和数据格式;仿真系统运行在一个通过局域网互连的由多台服务器构成的计算机集群中,采用分布式实时仿真体系结构。实物系统首先通过专用的半实物控制接口连接到一个接口处理计算平台上。半实物接口实现与实物系统的物理接口和协议适配,提取需要的数据并转发给接口处理计算平台;接口处理计算平台主要完成接口与协议格式的转换以及任务的协调与调度,然后将接口处理计算平台通过局域网与分布式仿真系统互连,从而实现仿真系统之间、仿真系统与实物系统之间的联合仿真。接口控制一方面涉及实物系统,是一个实时推进系统;另一方面涉及仿真联邦,是一个离散事件驱动系统,因此其功能要同时具有这两方面的功能,具有实时系统与离散事件系统两方面的功能,同时还要具有在这两种完全不同的系统之间进行转换、协调以及控制的功能,实现极为复杂,本章主要介绍分布式半实物仿真的通用技术与设计方法。

3.2.1 体系结构

分布式半实物仿真系统的设计应考虑技术先进性和实用性,满足不同仿真应用目标的需求,因此在设计时,应根据不同仿真系统的需要和实物系统的具体情况,采用不同

的设计原则和方法。例如：需要综合考虑国内外半实物仿真技术的发展趋势；采用先进成熟的软件实现，软件应具有通用性、可扩展性；支持标准 IP 报文与仿真系统的 IP 协议自动转换，支持实物—仿真—实物，仿真—实物，实物—仿真多种配置方式；在仿真系统内提供时间参数的配置，实现仿真系统时间的控制；基于 HLA 分布式仿真，实现联邦成员间事件传递和时间推进；遵循 HLA 标准：IEEE STD1516 系列标准；提供仿真统计的数据图表，具备直观分析的能力等。

HLA 作为目前的分布式仿真标准，通过提供一个开放的体系结构，实现不同仿真应用的重用与互操作，支持用户分布、协同地开发复杂仿真应用系统，并最终降低开发新应用系统的成本和时间。HLA 本身所固有的可重用性和可扩展性决定了可以将多个已开发的联邦进行互联，以快速地扩大仿真规模。针对网络半实物仿真的特点和 HLA 的基本原则，分布式半实物仿真的体系结构如图 3.2 所示。

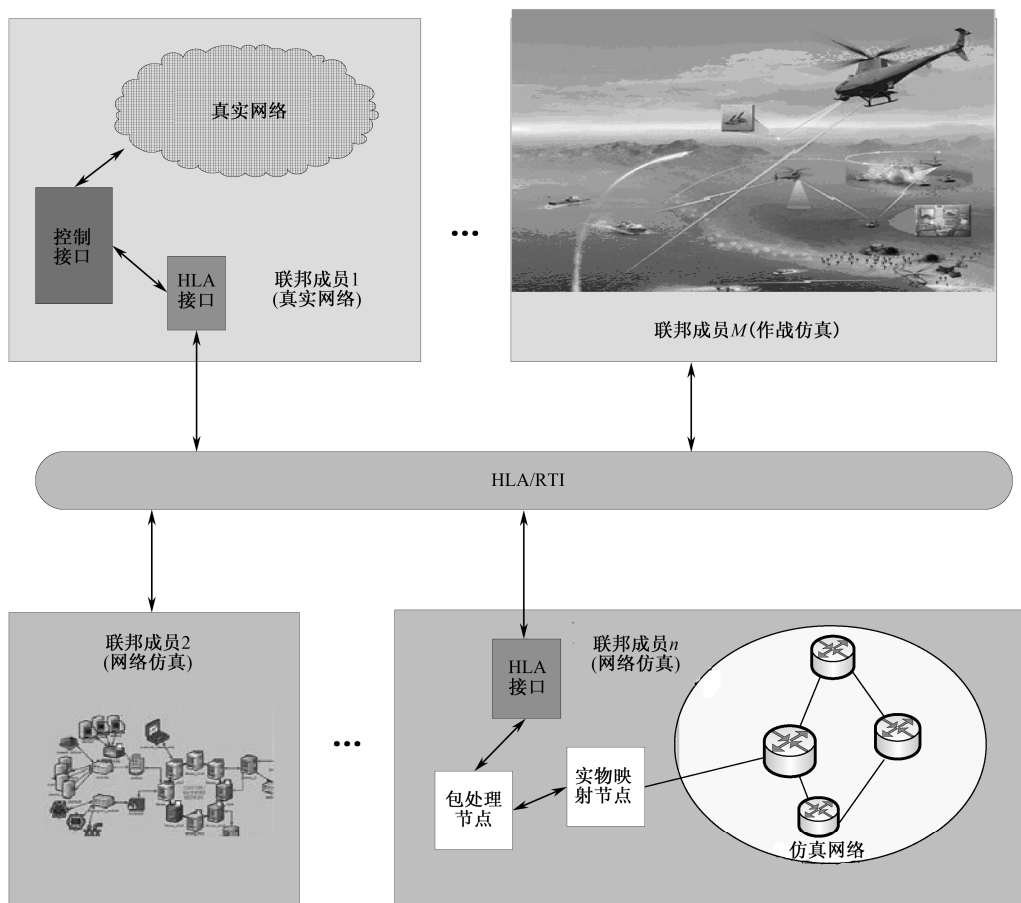


图 3.2 分布式半实物仿真体系结构

分布式半实物仿真体系结构要满足以下要求:

(1) 基于 HLA/RTI 的分布式操作: 系统的实物部分和网络仿真部分通过分布式仿真引擎和半实物接口连接, 信息在应用程序、物理设备、协议执行单元以相应的仿真组件之间交互。

(2) 实时的分布式仿真时间控制: 实物系统时间的独立推进与 HLA 系统离散时间的协调推进相统一, 保证其时空一致性。

(3) 可扩展的接口: 设计可扩展的系统结构, 以便于将来综合其他的网络和相关技术。

通常半实物仿真系统可以作为分布式仿真的联邦成员, 包含半实物控制接口和接口处理计算平台、实物系统等。半实物联邦成员实现实物系统和仿真系统的信息交互, 它一方面通过实际物理接口与实物系统相连, 实现各种实际信息流的交互; 另一方面又作为联邦成员, 通过 RTI 和仿真系统或其他系统交互信息。半实物联邦成员利用抓包工具对实物接口卡(通常是以太网口)上的数据包进行抓取, 并根据包的目的地, 将数据包转发至相应的仿真系统; 或者把仿真系统发来的信息传给真实的外部设备, 并提供仿真运行控制参数, 实现与真实系统的时间同步, 还可通过参数配置, 使仿真以不同的速度运行。半实物联邦成员主要包含以下几个功能模块:

(1) 抓包: 利用工具对实物接口卡上的数据包进行抓取。

(2) 接口转换: 实物系统与仿真系统所采用的分组格式、数据传输协议、地址格式以及对分组附加信息的要求都可能是不一样的, 接口转换主要完成这些转换功能, 使真实的信息分组能无缝地在实物系统与仿真系统之间流通。

(3) 路由转发: 要实现实物与仿真信息的互连互通, 接口要能进行正确的转发, 以使信息能在合适的时间内传递到合适的联邦成员的正确节点上。半实物仿真接口模块具有接收并记录来自主控的 IP 地址划分规则的功能, 根据该规则进行定制转发策略。

(4) 数据采集: 根据实物系统传递的参数, 收集必要的统计量, 并提供给仿真系统。

(5) 控制管理: 对接口的状态进行管理, 对接口的属性进行定制, 包括时间的外同步、事件队列的管理与控制等。实现基于 HLA 的接口数据转换, 将实物系统和仿真系统不同标准数据的正确转换, 进行时间管理与控制, 保证实物系统时间的独立推进与 HLA 系统时间的协调推进相统一。

3.2.2 信息流程

分布式半实物仿真示例如图 3.3 所示, 图中标明了实物节点、半实物仿真接口计算机、仿真网络的 IP 地址划分和网络连接拓扑结构。实物节点 A 发往目的节点 B 的真实数据包, 通过半实物仿真接口接入到虚拟的仿真网络, 仿真网络的映射节点 A、B 分别

对实物节点 A、B 进行了映射。真实数据包通过半实物接口进行数据包格式转换成仿真数据包，虚拟的仿真数据包通过仿真的网络传输，最后通过半实物接口进行仿真到实物的包格式转换，把数据包发到最终的目的端实物节点 B。

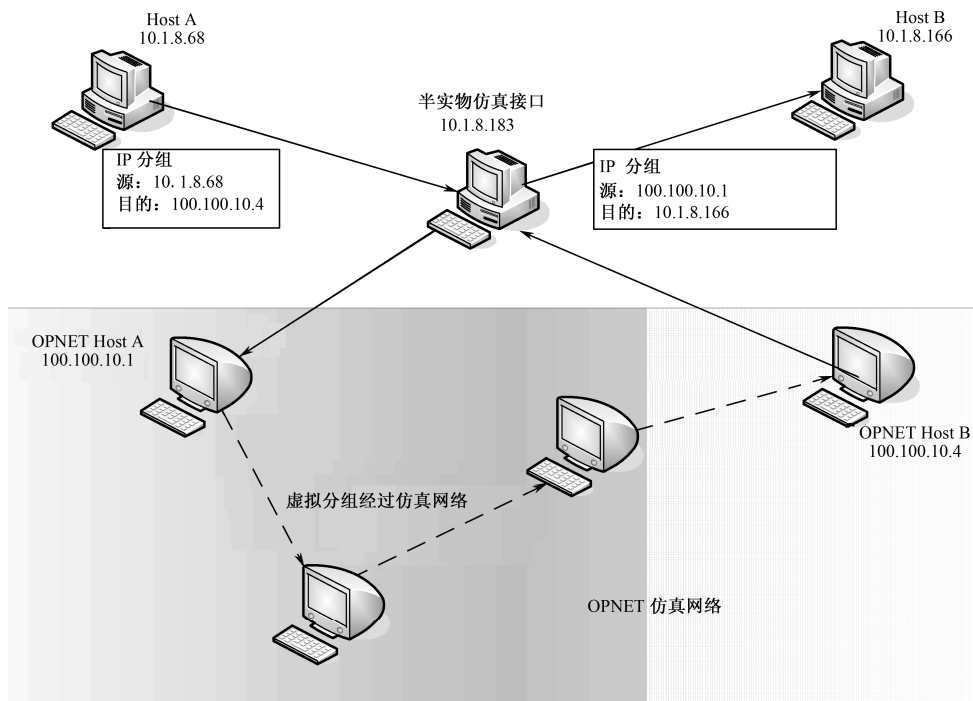


图 3.3 分布式半实物仿真示例

基于分布式半实物接口的数据分组的转换和传递过程如图 3.4 所示。

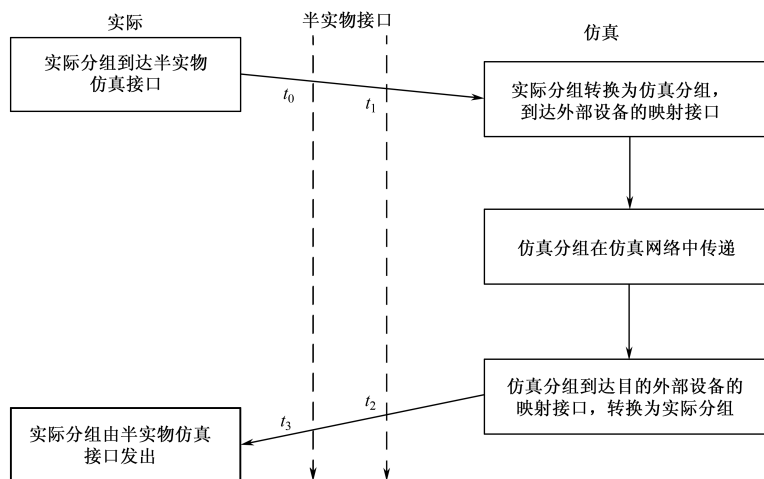


图 3.4 分组的转换和传递过程示意图

分布式半实物仿真系统是一个典型的实时、分布式交互仿真系统，真实设备通过规定的接口（可以是专用的业务接口，也可以是以太网口）与半实物接口计算机相连，半实物接口计算机和仿真系统之间的交互是基于 HLA 接口实现的。所有联邦成员加入联邦都通过 HLA 接口实现。HLA 接口将实物系统接入 HLA 结构的仿真联邦中，保证两者能够正确地进行交互，使整个仿真系统能够正确的运行。

在 HLA 设计中，没有定义类似于 DIS 中 PDU 那样特定的数据结构来专门进行数据交换，而是根据在 FOM 中定义的公布/订购关系进行交互，因此进一步提高了灵活性。分布式半实物接口基于 RTI 提供的 API 接口函数进行联邦成员之间的数据通信，RTI 提供了一系列服务来处理联邦运行时成员间的互操作和管理联邦的运行。根据 IEEE P1516.1 规定，RTI 提供了包括六大管理服务（联邦管理、声明管理、对象管理、所有权管理、时间管理和数据分发管理）及其支持服务在内的共计 130 个接口服务。

系统工作流程如下：

仿真启动，半实物接口通过 HLA 接口接收来自仿真主控的开始命令，接收到开始命令后，开始运行半实物仿真接口。

仿真运行过程中，半实物接口接收实物系统发来的各种数据包，包括需要转发到仿真网络的数据包或者无须转发的数据包。半实物接口接收到数据包后，首先解析出需要转发的数据包，通过 HLA 接口发给仿真系统中负责实物数据包处理的联邦成员，并推进仿真时间；实物数据处理联邦成员的 HLA 接口收到数据包后发给包处理节点，包处理节点收到数据包后，根据数据包的类型将真实数据包转换为仿真包，并发送到实物映射节点，实物映射节点将转换后的仿真包发送到仿真系统中。

仿真运行过程中，当实物映射节点接收到仿真包后，实物映射节点将仿真包发送到包处理节点，包处理节点将仿真包转换为真实数据包的 HLA 交互数据包，并通过 HLA 接口发送到半实物接口中，半实物接口收到真实数据包的 HLA 交互数据包后转换成真实数据包，并将真实数据包按规定的封装发送到真实设备上。

半实物接口通过 HLA 口接收来自仿真主控的结束命令，接收到结束命令后，停止运行半实物仿真接口。

真实设备和半实物接口之间交互的是真实的网络数据包，半实物接口和仿真系统之间交互的是 HLA 数据。通过在半实物接口中设置包过滤的条件，可以只抓取 IP 格式的数据包，减少无关数据包的分析，提升接口处理速度，由于真实数据包格式是通用格式，这里就不详细介绍了，下面主要介绍半实物接口和分布式仿真系统中交互的 HLA 交互数据信息。

在基于 HLA 的分布式仿真中，交互是指一个成员中的一个或一些对象产生的，能够对其他成员中的对象产生影响的明确动作。对象类结构表描述了对象类的层次关系，交互类结构表描述了交互实例的类与子类的关系，一个联邦成员订购了一个交互类，那么它将在联邦运行过程中收到所有属于该交互类的子类。

分布式半实物接口仿真联邦成员对象模型用标准对象模型模板 OMT (Object Model Template) 来定义。OMT 用来描述对象模型。HLA 的对象模型由一组描述对象的类、属性和它们之间交互关系的信息组成。它对应两个部分：FOM 和 SOM，分别描述在联邦执行过程中成员可以共享的信息和仿真成员在参与联邦运行时所能提供的能力。

为实现基于 HLA/RTI 的多仿真系统之间的互连互通，必须制定各个联邦成员的 SOM 和整个联邦的 FOM。建立 SOM 的目的是描述各个仿真成员在联邦运行过程中可以提供（公布）给联邦的信息，以及它需要（订购）从其他仿真成员接收的信息，它反映的是仿真成员具备的向外界“公布”信息的能力及其向外界“订购”信息的需求。建立 FOM 的目的是借助于 OMT 提供的标准化的记录格式，为一个特定的联邦中各成员之间需交换的数据的特性进行描述，以便各成员在联邦的运行中正确、充分地利用这些数据进行操作。

分布式半实物接口 OPNET 仿真模型的 HLA 类映射文件的格式如下所示：

```
(mapping version 2
  (interactions
    (class YEWU yewu
      (parameter APP app structure)
      (parameter DATA data structure)
    )
    (class APP_GENERATE app_generate
      (parameter INDEX index unsigned_long)
      (parameter TYPE type unsigned_long)
      (parameter NAME name structure)
      (parameter SIZE_BYTE size_byte unsigned_long)
      (parameter SOURCE source structure)
      (parameter DESTINATION destination structure)
      (parameter START_TIME start_time double)
      (parameter END_TIME end_time double)
      (parameter QOS qos unsigned_long)
      (parameter NODE_NUMBER node_number unsigned_long)
      (parameter NODE_LIST node_list structure)
    )
    (class RESULT result
      (parameter INDEX_EVENT index_event unsigned_long)
      (parameter APP_INFO app_info structure)
      (parameter SEND_NET_NAME send_net_name structure)
```

```

        (parameter DELAY delay double)
    )
    (class PUB_NETWORK pub_network
        (parameter NETNAME netname structure)
        (parameter NODENAME nodename structure)
        (parameter NET_CON_ACT net_con_act unsigned_long)
        (parameter NET_CON_DUR net_con_dur double)
        (parameter TRAFFIC_RECEIVED traffic_received double)
        (parameter TRAFFIC_SENT traffic_sent double)
    )
    (class PUB_MAC pub_mac
        (parameter NETNAME netname structure)
        (parameter NODENAME nodename structure)
        (parameter DATA_ACCESS_DELAY data_access_delay double)
        (parameter PACKET_COLLISION packet_collision double)
        (parameter PACKET_COLLISION_PER_SEC packet_collision_per_sec double)
        (parameter VOICE_ACCESS_DELAY voice_access_delay double)
    )
    (class PUB_ROUTING pub_routing
        (parameter NETNAME netname structure)
        (parameter NET_SEG net_seg structure)
        (parameter NET_SEG_LIST net_seg_list structure)
        (parameter NODE_IP_NUM node_ip_num unsigned_long)
        (parameter NODE_IP_LIST node_ip_list structure)
    )
    (class PUB_MOVING pub_moving
        (parameter NETNAME netname structure)
        (parameter NODENAME nodename structure)
        (parameter START_BEARING start_bearing double)
        (parameter END_BEARING end_bearing double)
        (parameter MOVE_SPEED move_speed double)
    )
    )
    )
    )

```

HLA 类映射文件详细定义了交互类和交互参数与 OPNET 仿真平台的交互包的映射关系,交互参数可以用来记录反映交互实例特点的各种信息,比如 class YEWU (业务类)就定义了两个交互参数,APP 是半实物接口发到仿真系统的业务格式结构定义,DATA 是网络上真实的数据包格式定义。对应到 OPNET 平台交互包的名称是 yewu,包定义了两个属性,分别为 app 和 data,都是结构体类型,具体结构的定义可以在头文件中进行,这样就建立了通用 HLA 的交互类定义和 OPNET 平台交互包格式的映射关系。

3.2.3 典型配置方法

半实物仿真接口具有通用性和可移植性,网络的实际设备通过规定的接口与运行仿真的计算机相连,就可通过该半实物仿真接口实现真实系统和仿真系统的信息交互。半实物仿真有三种基本的配置方法:

(1) 实物网络节点与计算机仿真网络中的虚拟节点信息交互。即实物网络节点报文发向计算机仿真网络中的虚拟节点,计算机仿真网络中的虚拟节点报文发向实物网络节点,如图 3.5 所示。

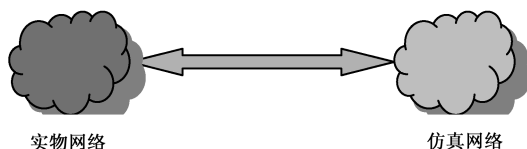


图 3.5 现实—仿真

(2) 仿真网络中虚拟节点报文经过实物网络后转发到另一个计算机仿真网络中的虚拟节点,如图 3.6 所示。

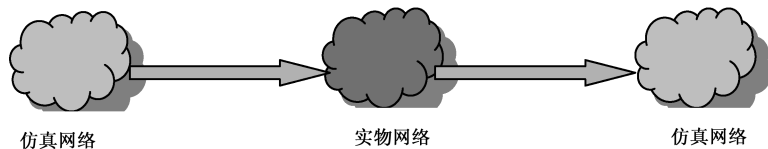


图 3.6 仿真—现实—仿真

(3) 实物网络节点报文经过计算机仿真网络转发到实物网络节点,如图 3.7 所示。

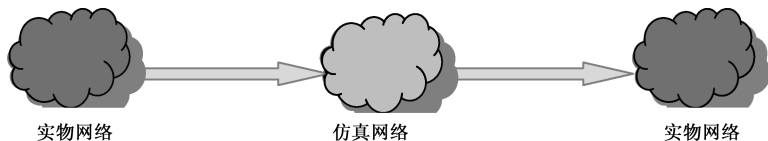


图 3.7 现实—仿真—现实

3.3 分布式半实物仿真的关键技术

在分布式半实物仿真系统中, 实物网络是由实际设备构成的与实际体系一致的实际通信网络, 采用设备自带的通信协议和数据格式; 仿真系统运行在一个通过局域网互连的由多台服务器构成的计算机集群中, 采用分布式实时仿真体系结构。在真实网络中, 主要是利用协议栈进行数据流的 TCP / IP 转发通信, 而在仿真网络中的协议栈是根据仿真的需求抽象模拟的, 不同的仿真需求可能会构造出不同的数据结构, 所以真实的物理设备和仿真网络无法直接通信, 半实物仿真接口需要完成数据包的截获和转换、时间同步, 将运行于真实协议栈中的数据包导入到虚拟的仿真环境, 并解决系统时间和仿真时间的协调同步问题。实物系统首先通过专用接口连接到一个接口计算机上, 该接口计算机主要完成接口与协议格式的转换以及任务的协调与调度, 然后将接口计算机通过局域网与分布式仿真系统互连, 从而实现仿真系统之间、仿真系统与实物系统之间的联合仿真。下面主要就分布式半实物仿真中涉及的关键技术进行详细的分析和研究。

3.3.1 包截获与包转换技术

半实物接口控制完成仿真系统与实物系统的接口转换与控制, 执行仿真管理与控制的命令, 执行仿真时间、事件与信息向实物系统的传递与协调, 进行信息格式的转换, 与仿真网络交换必要的业务和路由信息, 完成双向代理的功能。它一方面对仿真系统提供实物系统的仿真镜像, 把实物系统作为仿真系统的一个内部成员, 完成与仿真系统一样的功能; 另一方面对实物系统提供虚拟网络, 使仿真系统所构成的网络对实物系统就像一个真实的网络一样。

数据包的截获采用 WinPcapAPI 来实现, WinPcapAPI 是一套基于 NDIS (NetworkDriverInterfaceSpecification, 网络驱动接口规范) 的中间层驱动程序, 由内核级的网络组包过滤器 NPF (NetgroupPacketFilter Packet)、用户级的动态链接库 Packet.dll 和 Wpcap.dll 等 3 个模块组成。

网络组包过滤器 NPF 直接与网卡驱动程序交互, 获取在网络上传输的网络数据包, 它是运行于操作系统内核中的驱动程序。提供了包截获和发送数据包的基本功能, 还提供了一些数据包过滤和检测引擎等高级功能。

动态链接库 Packet.dll, 在 Win32 平台上为数据包驱动程序提供了一个公共的接口, 屏蔽了用户和不同 Win32 平台内核操作系统的接口差异, 提供了一个与系统无关的通用 API 接口, 可以执行如获取适配器名称、加载动态驱动器、获得主机掩码及以太网冲突次数等操作。

动态链接库 Wpcap.dll, 提供了一组功能强大且跨平台的函数, 利用这些函数, 可以忽略适配器和操作系统的类型, 含有诸如产生过滤器、定义用户级缓冲以及包注入等高级功能。

通过嗅探传输介质的方式实现包的捕获, 归结起来有以下功能:

(1) 包截获

包截获是最重要的操作, NPF 位于中间层可以直接过滤从网卡中接收到的数据包并原封不动地送往用户层应用程序。

(2) 数据包转储

利用 NPF 提供的数据包转储功能, 不需要用户应用程序的介入, 在内核层可以直接寻址文件系统, 大量减少了系统调用, 提高了转储的效率。

(3) 数据包发送

除了可以从网络中截获数据包, 还可以往网络发送数据包, 而且拥有更高的发送效率, 适合应用于网络高速流量测试。

(4) 网络监测

提供了内核层的监测模块, 不需要把数据包送到应用程序就能实现分类统计。统计数据直接来源于适配器驱动程序, 这样大大节省了内存和处理器资源。

基于中间层的 WinPcap 可以截获完整的帧, 或者说可以截获所有流过网卡的数据包。在此基础上可以根据帧头和报头分析协议类型, 进而可以实现包的过滤。这种涵盖了从内核态到用户态的三层模块包截获工具, 正好满足网络半实物仿真对原始数据包的需求, 因此仿真基于 WinPcap 进行网络数据包的截获和过滤。

数据包的转换模块收到数据包时, 如果是真实的数据包, 首先需要判断包格式和所属的协议, 然后调用相应的翻译函数, 当匹配到合适的翻译函数, 就对该输入包进行转换并生成仿真包。由于协议通常是按层嵌套的, 所以在包的转换时也是先进行低层协议的检测和翻译, 然后递归地调用其他检测转换函数, 最后利用 HLA 接口向仿真网络发送。如果是仿真网络传来的数据包, 需要根据实际网络的协议格式进行仿真数据包格式的转换, 完成实际数据包格式的封装后, 进行网络路由适配, 利用包发送模块进行实际网络的发送。

3.3.2 隧道模拟技术

一般的网络仿真, 所有的节点链路模型都是仿真建构的, 包括仿真的网络协议栈都是简化的甚至并没有协议层次的概念, 这样的仿真模型自然也不会事先考虑与真实网络通信的仿真能力, 所以造成了先天上的缺陷, 同时仿真的可靠性和准确性依赖建模的近似度。

然而在要求接入硬件实物进行联合测试的需求下, 通过网络仿真将实物接入是可行

的办法,但是这样的连接比较生硬。需要重新考虑,结合网络仿真和网络仿真的各自优势,建立一种新型的模型框架。模型要足够简单自然,满足设计需要,而又不失效率,实现两者的无缝联合,从而真正实现半实物的网络仿真仿真联合。

隧道技术摒弃了这样一种模拟协议栈的建构模型,模拟节点将直接利用真实网络的协议栈即 TCP/IP 协议栈进行通信,所建构的虚拟节点通过配备虚拟网卡,使得虚拟节点有着近乎真实节点的网络存在,而虚拟节点将直接调用网络 API 即通过真实 TCP/IP 网络协议栈与其他节点进行通信,而模拟环境只负责建构管理节点之间的模拟链路通道即可。这样建构的模拟网络环境便天然具备与真实网络通信的能力,并且因为直接利用真实网络协议栈,其模拟结果是可靠准确的。

利用隧道技术来实现虚拟网络的链路和物理网络的路径之间的对应关系。因此,半实物网络的全部隧道,对应着一个从虚拟网络的链路集合到物理网络的路径集合的映射,这个映射称为“隧道配置”。映射主要根据解析实物网络和虚拟网络的拓扑信息,将路由信息加入到路由表中,产生路径集合的映射表。

从虚拟网络和物理网络相互作用的角度看,隧道链路把物理网络上一个端到端的传递过程变成了虚拟网络上点到点的一跳,从而割裂了传统 Internet 体系结构中应用层端到端和网络层端到端的一致性。在最终用户看来,网络所表现出来的行为将不再与物理网络的网络层端节点上观察到的现象相吻合,而物理网络的端节点之间的流量行为也不再符合用户信源的基本规律,物理网络上端到端传递的分组之间的相关性将因为这种不一致的“端到端”而大大提高。隧道配置在影响这种不一致性中起着举足轻重的作用。半实物接口的隧道模拟技术具有无须拥有独立基础设施、可以灵活部署的优点,可用于解决该问题。在建立半实物网络仿真的环境里考虑实物—仿真的隧道,即在实物的物理网络上建立仿真的虚拟网络。相对于双协议栈的实物—仿真网络来说,这么做的好处是明显的:一方面,不再需要所有的虚拟设备都必须支持实物网络,为实现从虚拟网络全面过渡到实物网络创造了条件;另一方面,回避了同时管理两套交错在一起的协议栈而可能造成的复杂局面,并使得用户只需简单的配置即可实现实物—仿真的路由和路径匹配。

实物系统的地址配置与仿真系统的地址配置不一定一致,不同的仿真任务仿真对象的组织形式与配置也不一样,因此需要在仿真前,根据仿真任务的需求来调整联邦成员内仿真对象的网络组成与配置,即联邦成员内仿真对象的地址是动态改变的。需要采用隧道技术来记录实物系统所配置的 IP 地址范围,记录各联邦成员内仿真对象的地址范围,以实现信息的订购、分发,并建立这些地址与所使用的计算机的物理 IP 地址的映射关系,产生隧道配置映射表,并通告给实物接口模块以及各联邦成员。隧道映射表具有记录 IP 地址划分规则的功能,具有地址代理通告的功能,根据该规则进行定制转发策略。由于建立隧道虚拟链路等同于在隧道两端建立地址映射的状态信息,即隧道配置映射。因此,它需要双方交换各自的实物网络地址和虚拟网络地址信息,并且进行恰当的

配置。它能接受来自用户的建立隧道的请求，管理一个或者一组隧道映射表，调度它们的资源为适当的用户提供接入服务。

上面提到了隧道技术需要建立虚拟网桥和虚拟网卡。虚拟网桥的基础是虚拟网卡，因为运行模拟仿真平台的机器不可能提供许多真实的硬件网卡供任意数目的虚拟节点使用，所以基于单独的网络接口创建若干虚拟网卡和地址便可以解决问题，其作用在于让每一个模拟节点拥有类似真实节点的通信能力。因为单独的真实网络接口只收集该网络接口地址的数据包，在基于虚拟网卡的基础之上，虚拟网桥的作用在于在单独的网络接口上监听收集模拟网络环境中模拟节点的虚拟网卡地址的有关信息，并负责虚拟地址和真实地址之间的数据包传递，从而真正的将模拟网络和真实网络联结起来，并且在此基础上可以实现分布式模拟仿真。

虚拟网桥/网卡的实现将使用 NDIS MUX Intermediate Drivers 技术框架。MUX 框架按照虚拟的驱动与真实 NIC 接口的绑定关系有三种框架：one-to-n、n-to-one 和 m-to-n，其中重点应用的是 one-to-n 和 n-to-one 框架。在 one-to-n 绑定模式下，可以将多条真实链路合并为一条虚拟链路。而重点所要应用的还是 n-to-one 模式，以便实现虚拟网卡网桥，从而实现虚拟结点的通信功能。

具体虚拟网桥/网卡实现的要点有以下两点：

(1) 中间层驱动程序的动态绑定

中间层驱动程序必须提供 ProtocolBindAdapter 和 ProtocolUnbindAdapter 函数以支持对低层 NIC 的动态绑定。当 NIC 可用时，NDIS 调用中间层驱动程序（能够绑定到 NIC）的 ProtocolBindAdapter 函数实现动态绑定操作。

绑定时的操作包括为该绑定分配 NIC 相关的环境区域并进行初始化，接着调用 NdisOpenAdapter 绑定到指定的适配器。该适配器可以是低层 NIC 驱动程序管理的 NIC，也可以是介于被调用的中间层驱动程序和管理适配器的 NIC 驱动程序之间，由中间层 NDIS 驱动程序导出的控制传输请求的虚拟 NIC。

(2) 打开中间层驱动程序下层的适配器

ProtocolBindAdapter 函数通过传递的参数值句柄打开低层 NIC 或虚拟网卡，从而建立到低层 NIC 驱动程序的绑定，它也能够从注册表中读取所要求的附加配置信息。NdisOpenProtocolConfiguration 用于获取指向中间层驱动程序存储适配器相关信息的注册表主键句柄。中间层驱动程序通过调用 NdisOpenConfigurationKeyByIndex 函数或者 NdisOpenConfigurationKeyByName 函数打开并获取主键（由 NdisOpenProtocolConfiguration 函数打开）下的子键句柄。然后，中间层驱动程序能够调用 NdisRead（Write）Configuration 函数读写注册表主键或子键下的相关信息。

ProtocolBindAdapter 使用环境区域存储所有绑定相关信息（与绑定适配器相关联的），绑定操作最终由 NdisOpenAdapter 函数调用来实现。

中间层驱动程序传递代表绑定相关环境区域（已经分配并初始化）的句柄。NDIS 在未来与绑定相关的调用中，将向中间层驱动程序返回该环境。

3.3.3 HLA 接口设计

HLA 的接口模块为多个成员提供了必要的机制来共享公共的对象、交互消息以及维护时间同步。HLA 的接口设计主要实现分布式仿真基本功能：通过运行支撑系统 RTI 提供的服务进行互连、互通和互操作，将实物系统和仿真系统的不同标准数据进行正确转换、时间管理与控制，保证实物系统时间的独立推进与 HLA 系统时间的协调推进相统一。主要包括三部分的功能。

1. 分布式仿真基本功能

HLA 的接口模块应遵循统一的建模规则和接口标准，遵循 IEEE STD1516.1-2000 定义的接口规范，符合 HLA 体系结构标准，并通过 RTI 进行互连、互通和互操作，并对 RTI 提供的服务进行封装。RTI 提供了共计 130 个接口，构成六大管理服务及其支持服务，以 API 接口函数形式提供给成员使用。

HLA 的接口模块还提供其他分布式仿真功能，包括自动初始化联邦成员，加入联邦，在仿真中创建、销毁并发现 RTI 对象，收到 RTI 对象属性更新后自动更新成员对象属性，可以自定义 RTI 合成员对象之间的映射关系，特定的属性集等。

2. 不同标准数据的正确转发

在基于 HLA 的分布式半实物仿真系统中，信息交互采用的是对象属性的更新、交互信息的发布与订购，RTI 通过条件更新、路径空间等方法对物理传输性能进行优化；实物系统的信息交互一般采用物理报文的收发方式，按时发送、结构固定。二者协议不同、信息交互机制也不相同，需要接口设备来完成数据转换处理。

3. 时间管理

分布式仿真的一个重要特点是其时间推进机制的异构性，不同系统（联邦成员）使用不同的内部时间推进机制，但彼此间又必须协调一致。

HLA 接口模块是通过合理调用 RTI 的服务来达成分布式仿真联邦统一运行的目的。基于 HLA 的仿真接口设计可以基于 C++ 等成熟编程工具开发。为实现基于 HLA/RTI 的多平台仿真系统之间的互连互通，必须制定各个联邦成员的 SOM 和整个联邦的 FOM。根据典型网络的特点建立各自的 SOM，描述各个仿真成员在联邦运行过程中可以提供（公布）给联邦的信息，以及它需要（订购）从其他仿真成员接收的信息，它反映的是仿真成员具备的向外界“公布”信息的能力及其向外界“订购”信息的需求。利用 FOM

文件可以借助于 OMT 提供的标准化的记录格式, 为一个特定的联邦中各成员之间需交换的数据的特性进行描述, 以便各成员在联邦的运行中正确、充分地利用这些数据进行互操作。

在进入仿真执行之前, 各仿真节点需要启动 RTIExec 的守护程序。联邦中第一个成员启动, 向 RTIExec 请求创建联邦, RTIExec 收到请求后, 首先判断需要创建的联邦执行是否存在, 如果不存在, 由 RTI 建立联邦管理线程 FedExec, 它将充当联邦执行过程中这个联邦的管理者。对 RTIExec 来说, 它需要将 FedExec 的地址 (IP、端口号等) 通知所有的 RTI。FedExec 创建后, 循环等待一段时间让成员加入。成员启动后通过 RTIAmbassador 得到 FedExec 的地址, 向 FedExec 申请加入 (调用 RTIAmbassador 的 JoinFederation)。FedExec 记录这个成员的信息。在仿真运行之前, 各成员通过声明服务指明它们要交换的数据信息, 根据仿真模型更新自身的状态参与联邦交互。调用 RTIAmbassador 的 SubscribeObject Class Attribute 和 PublishObjectClass 服务。这些数据声明在联邦执行过程中可以动态改变。

成员包括一组仿真实体对象, 当成员在执行过程中创建对象时, 调用 RTIAmbassador 的 RegisterObjectInstance。分配该对象唯一的标识号, 激活方法 DiscoverObjectance, 将新对象的 ID 插入到其他成员的发现队列中, RTI 调用 FedAmbassador 的方法 ReflectAttributeValues, 完成这个实体的状态初始化。成员加入联邦执行中需要激活方法 requestObjectClassAttribute, RTI 将从 FedExec 处获得远程成员信息和远程对象实体列表及属性值。成员在某一对象状态发生变化时, 将其记入更新链表或给予标示。在成员的一次循环处理结束时, 扫描状态发生变化的对象并调用 RTIAmbassador 的 UpdateAttributeValues, 发送更新的状态。

RTI 得到对象的更新数据, 根据公布、订购以及路由区域进行数据和发送成员的过滤, 调用 FedAmbassador 的 ReflectAttributeValues, 发送给相应的成员。成员收到数据, 根据对象 ID 到本地对象队列中查找并进行数据更新, 如果没有找到, 则到发现 (Discover) 队列中查找并将其转移到本地对象队列中, 赋予其属性值。本地对象队列存放的是成员感兴趣的对象, 发现队列存放的是暂时和成员没有关系的那些对象。当一个对象要从系统中删除时, RTI 发消息通知各成员去除该对象在成员内部的表示, 调用 FedAmbassador 的 DeleteObject 实现。

RTI 实现接口规范中定义的服务, 目的是将仿真应用与底层通信及基本功能相分离, 由 RTI 提供底层的通信和基本功能支持。在一个联邦的执行过程中, 所有的联邦成员按照 HLA 接口规范所要求的方式与 RTI 进行数据交换, 实现成员间的互操作。RTI 提供的功能相对于联邦成员是透明的, 联邦成员不必涉及底层的数据通信管理, 可将精力放在各个仿真节点本身应用领域有关的仿真应用程序开发上。同时遵循 RTI 接口标准的仿真应用可灵活组成功能各异的联邦, 有利于仿真构件重用及满足不同场合的需要。

可以基于商用的 RTI 平台提供的函数库来实现 HLA 接口模块的开发。RTI 提供了 libRTI 库, 库中包括 RTIAmbassador 和 FederateAmbassador 两个核心类。RTIAmbassador 类实现了由 RTI 提供的服务, 如对象的注册、属性更新、对象删除、交互发送等, 成员采用 RTIAmbassador 类的方法调用对联邦发出请求, 通过事先定义的通信信道进行服务请求。FederateAmbassador 是个抽象类, 定义了成员必须实现的回调函数的原型, 如对象的发现、属性的反映、对象撤销通知、交互的接收等, 这种回调函数机制是联邦通知成员的方式, 但这些函数均定义为纯虚函数, RTI 并不提供这些函数的实现, 回调函数由开发人员根据联邦成员的具体交互要求有选择的实现, libRTI 采用异步方式响应成员的许多请求并接收网络的消息。成员与 RTI 之间的接口就是由 FederateAmbassador 和 RTIAmbassador 的两个对象来实现的。

利用 RTI 的库函数设计 HLA 接口的工作流程如下:

- 联邦开始时, 管理联邦成员的初始化;
- 创建联邦执行;
- 加入联邦执行;
- 声明公布/订购关系;
- 确定成员的时间推进策略;
- 成员创建和发送交互时, 把由仿真程序产生的交互包进行转换和发送;
- 其他成员接收交互时, 把接收进来的交互进行转换并分发到仿真模型;
- 在成员创建对象实例, 生成映射成仿真对象的 HLA 实例;
- 在其他成员发现对象实例时, 对 HLA 对象与相应的仿真对象进行映射;
- 在成员更新它们的属性值时, 把仿真的更新数据转换成 HLA 的更新数据;
- 在其他成员得到属性更新时, 使接收到的更新的属性生效;
- 请求时间推进;
- 时间推进许可, 仿真推进;
- 仿真结束;
- 退出联邦执行;
- 撤销联邦执行。

基于 OPNET 平台的 HLA 接口与通用的 HLA 接口所用的参数有一些不同, 需要使用参数翻译文件。Mapping 映射文件把两个不同实体所采用的参数对应起来, 起到一个桥的作用, 此文件具有以下两个功能:

- 把 Modeler 实体所用的参数转换成 HLA 实体用的参数;
- 把 HLA 实体所用的参数转换成 Modeler 实体用的参数。

Mapping 文件定义了 Modeler 实体和 HLA 实体, 它们之间的参数不是完全相同的, 具体情况如表 3-1 所示。

表 3-1 Modeler 与 HLA 实体之间的转换关系

Modeler-HLA 转换	
Modeler entity	HLA entity
Object type	Object type
Attribute Attribute	Packet Interaction
Packet field	Parameter

成员的仿真流程主要包括以下几个步骤：

- ① 初始化成员数据：初始化成员的仿真对象；
- ② 创建联邦执行：第一个加入联邦的成员调用 RTI 的联邦创建函数时创建联邦，并定义了该联邦的名称及 fed 文件，在 fed 文件中定义了各联邦成员间需要交互的属性类；
- ③ 加入联邦执行：联邦成员调用 RTI 的成员加入函数来实现。在该函数中，必须指定要加入联邦的名称，联邦成员名称以及这一成员的成员代理类的对象指针，函数返回该成员对应的句柄；
- ④ 信息的公布与订购：公布该成员需要向联邦中其他成员提供的信息以及订购仿真过程中所需要的其他成员的信息；
- ⑤ 设置成员的时间推进策略：根据系统的需求设置该成员的时间推进方式及相关参数；
- ⑥ 仿真模型计算：在这里完成联邦成员的主要仿真；
- ⑦ 请求时间推进；
- ⑧ 将仿真的控制权交给 RTI，调用 RTI 代理的 tick（）函数：由于 RTI1.3v6 不是一多线程应用，本地 RTI 部件需要一定的时间来处理诸如信息的交换等操作，tick（）函数就是用来完成这一任务的，在其操作期间，成员代理对象的一些函数就可能被调用以获取新接收到的交互信息，处理回调函数；
- ⑨ 时间推进许可，仿真推进，否则返回到⑦；
- ⑩ 如果仿真未结束，则返回到⑤，否则继续；
- ⑪ 成员退出联邦；
- ⑫ 删除联邦：由最后退出联邦的成员执行，如果联邦中还有未退出的成员，则会给出提示，并继续保留该联邦。

根据上面给出的仿真流程，这里以 C++语言为例，给出成员流程实现的部分代码：

//初始化成员数据，定义 RTI 代理类和成员代理类的对象

RTI: : RTIambassador rtiAmb;

MyFederateAmbassador fedAmb;

```

//创建联邦执行
rtiAmb.createFederationExecution (fedExecName, fed-file name) ;
//成员加入联邦, 返回成员句柄
federateHandle = rtiAmb.joinFederationExecution (federate - name,
federation name, &fedAmb) ;
//公布、订购交互信息
RtiAmb.subscribeObjectClassAttributes (obj - Handle,
AttributeHandleSet *param) ;
RtiAmb.publishObjectClass (obj-Handle, AttributeHandleSet*
param) ;
RtiAmb.subscribeInteractionClass ( Interaction-Handle) ;
RtiAmb.publishInteractionClass ( Interaction-Handle) ;
//设置时间推进方式: 既受限又约束
rtiAmb.enableTimeConstrained () ;
rtiAmb.enableTimeRegulation (grantTime, Lookahead) ;
//仿真模型的计算
//依据不同系统的要求进行实现;
//请求时间推进
rtiAmb.timeAdvanceRequest (requestTime) ;
//调用 tick () 函数
rtiAmb.tick (minTime, maxTime) ;
//更新对象实例属性值
rtiAmb.updateAttributeValues () ;
//发送交互实例
rtiAmb.sendInteraction () ;
//判断仿真结束与否, 若否, 返回到⑤;
//退出联邦
rtiAmb.resignFederationExecution () ;
//最后退出的成员删除联邦
rtiAmb.destroyFederationExecution ( fedExecName) ;

```

3.3.4 时间管理策略设计

为了保证仿真系统的协调运作, 维护虚拟世界中正常的因果逻辑顺序, HLA 需要对联邦进行严格的时间管理。HLA 严格的时间管理算法保证了时间逻辑的严格正确性, 但

却不利于实时仿真,为半实物仿真造成了一定的困难,半实物仿真系统加入 HLA 后的时间管理策略就成为一个关键的问题。在仿真场景中配置时间控制参数,使仿真以不同的速度运行,在半实物仿真中,把该参数配置为 1,可以实现与真实系统的时间同步,进行实时的仿真。

半实物仿真的一个显著特点是硬件在回路 (Hardware In The Loop)。在对系统进行仿真时,若有实物介入整个仿真系统,必须要求仿真时间标尺与实际系统时间标尺相同,这种仿真称为实时仿真。实时仿真系统要求仿真时间 (SimulationTime, ST) 和自然时间 RT (Real Time, RT) 保持一致,即有 $ST=RT$ 。为了满足半实物仿真的要求,HLA 必须采用特定的时间管理机制。实时协调同步是半实物仿真的基本要求,整个联邦的推进步调受一个时间控制 (regulating) 的联邦成员控制。如果一个时间控制的联邦成员停止推进它的仿真时间,那么整个联邦都会停止推进;如果一个时间控制的联邦成员按照自然时间到来时推进它的仿真时间,那么其他联邦成员的推进都将与自然时间一致。

RTI 约束所有联邦成员的仿真时间,其中一个联邦成员根据自然时间的步调推进仿真时间,那么所有的联邦成员都以自然时间的步调推进仿真时间。因此为了实现实物与仿真的同步运行,有一个重要的前提,即联邦能比自然时间运行得快。如果联邦的运行速率不能超过自然时间的推进速率,则会发生不同步,因为 RTI 没有能力加快联邦的运行速度。

时间管理是分布式半实物仿真系统的难点之一,时间管理对系统的统计结果、仿真的运行都极为重要,它的管理方法直接关系到对仿真系统的管理与控制的难度。时间管理与控制涉及仿真系统的软件构成、系统运行调度、事件发生与处理方法、系统硬件性能等各个方面,目前还没有一致的解决办法,只有在一些合理的假设下进行某些变通处理。

时间管理涉及几方面:首先,是各实体之间的物理时间如何同步到一个时间基准上,使系统在一个全局的时钟下运行,并保持必要的时间精度;其次,是仿真系统的仿真时间如何与自然时间对应,它们之间保持什么样的推进关系,这与仿真系统的推进机制以及事件发生的性质都有关系;最后是仿真系统的仿真时间与实物系统的物理时间之间的对应关系,由于每个事件都可能需要仿真系统和实物系统的协同,那么仿真时间如何与实物系统的物理时间对应是必须要解决的问题。

在分布式半实物仿真系统中,仿真时间是分布式仿真中的核心概念,仿真中只要产生与时间相关的事件,都需要在事件中加上产生该事件时刻的时间参数,即“时戳”,如属性值的更新、交互实例的发送、对象实例的登记和删除等,这些事件由成员通过调用 RTI 的服务产生,所有事件的时戳均满足下面的定理:

定理 3.1 控制成员 (Regulating Federate) 不能发送过时的时戳消息。

只有控制成员才能发送带时戳的消息,其所能发送消息的时戳不能小于该成员当前

逻辑时间加上其前瞻值 (Lookahead) 之和。

定理 3.2 受限成员 (Constrained Federate) 不能接收过时的时戳消息。

只有受限成员才能接收带时戳的消息, 其所能接收消息的时戳不能小于该成员的当前逻辑时间, 否则, 即为该成员收到过时时戳消息, 这是 IEEE1516 标准所不允许的。

实物系统采用物理时钟推进, 系统中各设备分别按照自己的物理时间推进, 时间不可控; HLA 系统各成员的时间由 RTI 集中管理, RTI 通过时间管理服务将仿真推进速度不同的各成员协调起来, 保证联邦范围内时间逻辑的正确性。在有实物系统接入的情况下, 要保证整个仿真系统的正确运行, 需要保证实物系统时间的独立推进与 HLA 系统时间的协调推进相统一, 即保证实物系统发生的时间能够在 HLA 联邦成员的时间轴上正确的发生, HLA 联邦成员的事件能够在实物系统的物理时间轴上正确的发生。

通过分析 HLA 的时间策略, 有三种方法可以解决实物系统接入 HLA 仿真联邦。

(1) 时间非控制不受限

所有联邦成员都采用时间非控制不受限, 各成员都按照统一的物理时钟独立推进, RTI 不参与时间步调的协调。此种情况, HLA 接口设备在程序处理上比较简单, 按照接收顺序处理信息, 信息时间以信息结构上的时戳为准, 但它不能发挥 HLA 仿真的特点。

(2) 时间控制并受限

所有联邦成员都采用时间控制并受限, 但是其他联邦成员必须推进的比实物系统的成员快, 因为实物系统的时间不可控, 这样才能保证实物系统时间的独立推进与 HLA 系统时间的协调推进相统一。

(3) 时间控制不受限

接口设备采用时间控制非受限, 其他联邦成员采用时间非控制受限, 同样存在一个前提条件其他联邦成员必须推进的比实物系统的成员快, 数据转发处理延时较小, 能保证接口接收到时间的逻辑顺序。

为了简化设计, 通常采用半实物接口时间控制不受限的时间策略, 其他联邦成员采用时间非控制受限的时间策略。但是如果半实物接口联邦成员的逻辑时钟总是跟不上物理时钟, 可能导致受到它限制的联邦成员逻辑时钟都跟不上物理时钟。因为 RTI 必须保证消息传递的逻辑正确性, 这样就会延迟 TSO (Time Stamp Order) 消息的传输, 从而导致 RTI 推迟批准其他联邦成员时钟推进的请求, 并最后引起联邦中许多联邦成员的逻辑时钟落后于物理时钟。

将 HLA 接口模块设置为时间控制不受限, 主要通过 enableTimeRegulation (打开时间控制状态函数) 时间控制请求服务完成。该服务表示成员向 RTI 请求欲成为时间控制成员。在联邦时间推进时要考虑该成员的逻辑时间, 该服务带一参数, 指定的 Lookahead 值为该控制成员的前瞻值。随后如有 timeRegulationEnabled+ (时间控制状态许可回调函数) 成功回调表明该成员已成为时间校准成员。

将 HLA 接口设置为时间非控制受限主要通过 `enableTimeConstrained`（打开时间时间受控状态函数）时间受限请求服务完成。该服务表示成员向 RTI 请求欲成为时间受限成员，该成员在时间推进时要考虑该校准成员的逻辑时间。随后如有 `timeConstrainedEnabled+`（时间受控状态许可回调函数）成功回调表明该成员已成为时间受限成员。

除了上述服务以外，还涉及 `timeAdvanceRequest`（步进时间推进请求函数）时间推进请求服务和 `nextMessageRequest` 一消息请求服务。时间推进请求服务表示基于时间步长成员向 RTI 请求时间推进，该服务带一参数，指定的 `Targettime` 值为该成员的请求到达的目标逻辑时间。随后如有 `timeAdvanceGrant+`（时间推进许可回调函数）成功回调，表明该成员已到达所请求的目标逻辑时间点。下一消息请求服务表示基于事件推进成员向 RTI 请求时间推进，该服务带一参数，指定的 `Targettime` 值为该成员的请求到达的目标逻辑时间。随后如有 `timeAdvanceGrant+`成功回调，表明该成员已到达所请求的目标逻辑时间点，但如果该成员在向目标逻辑时间推进的途中有新的事件消息到达，则推进到事件消息到达时刻逻辑时间，本次推进请求结束，如想继续向前推进，需要再次调用请求推进服务。

RTI 时间管理服务的主要目标是在满足一致性和因果性前提下尽可能快地使成员向前推进，成员通过调用 `TimeAdvanceRequest` 服务向 RTI 表明它的推进意图，那么 RTI 开始计算该成员向前推进的条件，若条件满足则向该成员发出 `TimeAdvanceGrant+`回调以推进该请求成员的逻辑时间。一个正确、高效的时间管理算法，是保证 RTI 产品的性能优越的重要因素。

第4章 战术通信仿真模型构建技术

战术通信是一个复杂的系统,涉及很多方面以及很多复杂的技术,要建立一个与战术通信系统完全对应的仿真系统,需要对仿真建模方法进行深入的研究。通过该方法,可以根据不同战术通信系统实际情况,开发专用的仿真模型和仿真平台。

战术通信系统主要是为战术应用服务的,使用环境复杂,而且具有动态性与自组织性等特点,其性能不仅与它自身的设计有关,而且涉及使用环境、使用模式等诸多因素,难以全面穷举它所面临的问题,无法确定问题的边界条件或约束条件,无法准确地确定某种情况下战术通信系统的内部状态与状态之间的转移关系,不能获得闭合的数学解析解,也无法通过数学模型或技术分析来获得其性能的客观科学评估。因此必须通过建立仿真系统对战术通信系统及其关联因素进行仿真,以获得科学的具有指导意义的性能参数。如何合理地舍弃一些次要因素,建立专用的战术通信网络仿真模型,在简化仿真系统建设复杂度的同时,又不失客观性与科学性,是本章的主要目标。

本章从战术通信系统对业务提供的性能出发,从节点之间的端到端时延、吞吐量、丢失率等入手,对战术通信系统的层次模型、节点模型以及网络模型及其接口关系进行描述。本章主要内容包括仿真建模方法、协议模型、节点模型以及模型的应用。其中建模方法部分为仿真系统建模方法提供理论的分析与依据;而协议模型部分则对战术通信系统的各协议层次建模进行研究分析,建立各协议层的数学模型及接口关系,实现协议模型的可重用性和可扩展性;节点模型部分定义战术通信系统网络节点的层次模型结构、数学模型以及接口关系,以满足战术通信不同规模、不同粒度的网络仿真需求以及不同应用的分布式仿真需求;模型应用部分主要从应用角度出发,结合具体的仿真应用,研究仿真建模与试验流程。

4.1 仿真建模方法

4.1.1 建模基本途径

战术通信系统主要用于支持作战地域内运动作战时战场态势、指挥控制、武器控制和战斗支援等信息的传输。对战术通信系统来说,业务的服务性能是它最重要的衡量指标。

向性的。在源—目的节点之间所建立的路由，代表了一条从源节点到目的节点之间的逻辑通路，更是有明确的方向性。基于上述考虑，我们可以采用有向图来对战术通信系统进行建模分析，并对战术通信系统对业务的端到端服务性能进行分析。

战术通信系统的拓扑结构用图 $G(V, E)$ 来表示以示区别，如图 4.1 所示，其中 V 是节点集，可以表示具有交换和路由功能的通信车，也可以表示子网； E 是边集，表示通信链路。 $n = |V|$ ， $m = |E|$ ，边 $e_{ij} \in E$ 标识为 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ ，表示从节点 v_i 到节点 v_j 之间的一条直接相连的链路，代表这两个节点之间的信道，它可以是一个集合， $i, j = 1, \dots, n$ ， $v_i, v_j \in V$ 。

这样，有向图 G 上的一条路径：

$$\begin{aligned} P &= (v_1, v_2, \dots, v_k), k \leq n \\ &= V \Theta (e_{12} \dots e_{(k-1)k}) \end{aligned} \quad (4-1)$$

其中 v_1 是源节点， v_k 是目的节点，从源节点到目的节点的跳数为路径 P 所经过的链路数： $H(P) = k - 1$ 。 $(e_{12} \dots e_{(k-1)k})$ 表示由路由算法所选择出来的路由的边。 $V \Theta$ 表示顺序取出路径的边所经过的节点。

设源节点 v_1 上有一个业务源 $S(t)$ ， t 是业务产生的时间，目的节点是 v_k ，所收到的业务是 $D(t')$ ，则可以求相关路径上的最大带宽、时延、数据丢失率等函数。

端到端最大吞吐量，是路径 P 上所有边（链路）中通信带宽的最小值。

设每条边的通信带宽为 $C(e_{i(i+1)})$ ，因此有端到端吞吐量 $R(P)$ ：

$$R(P) = \min \{ C(e_{i(i+1)}) | i = 1, 2, \dots, H(P) \} \quad (4-2)$$

可见对战术通信系统节点之间的通信带宽取决于由路由算法所选择出的路径中的最小带宽，忽略一些次要的因素，可见业务的端到端吞吐量 $R(P)$ 与节点的信道带宽和信道分配方式密切相关。

对于节点之间的端到端时延 $D(P)$ ，它由路径 P 上所有节点与边所带来的时延之和。

设 $D_n(v_i)$ 表示业务在节点 v_i 中处理所带来的时延， $D_e(v_i, v_{i+1})$ 表示业务从节点 v_i 处理后在边 $e_{i(i+1)}$ 传输所带来的时延，因此有端到端时延 $D(P)$ ：

$$D(P) = \sum_{i=1}^{k-1} D_n(v_i) + \sum_{i=1}^{k-1} D_e(v_i, v_{i+1}) \quad (4-3)$$

式中， $D_n(v_i) = \frac{\text{size}(S(t))}{\lambda_{v_i}}$ ，表示节点发送业务所带来的排队时延，包括网络层流量控制

以及链路层媒体接入对分组进行排队所带来的时延之和。 $\text{size}(S(t))$ 代表 $S(t)$ 的数据包大小 (kbit)， λ_{v_i} 代表节点 v_i 对业务的平均等价服务率，与网络层流量控制算法以及链路

层媒体接入协议有关。 $D_e(v_i, v_{i+1}) = \frac{\text{size}(S(t))}{C(e_{i(i+1)})} + \frac{l_{ij}}{\text{tr}_{ij}}$ ，代表业务在信道发送的时延以及空

中传播的时延。 $C(e_{i(i+1)})$ 代表节点的通信带宽,与节点的信道带宽与信道分配方式密切相关。 l_{ij} 表示节点 v_i 和 v_{i+1} 之间的距离, tr_{ij} 表示信道电波传输的速度。

业务丢失率 $L(P)$ 取决于节点的排队丢失率与信道的传输丢失率。突发的业务流如果大于网络层流量控制的自由缓冲空间,就会发生溢出,从而增加分组丢失率;同时信道传输的不可纠误码率也会影响数据的正确传送。

设 $L_r(v_i)$ 表示由于节点 v_i 处理所引起的分组丢失率, $er(v_i, v_{i+1})$ 表示业务在边 $e_{i(i+1)}$ 传输并进行纠错处理后的丢失率,路径 P 上的丢失率 $L(P)$ 则为:

$$L(P) = 1 - \prod_{i=1}^{k-1} [(1 - L_r(v_i))(1 - er(v_i, v_{i+1}))] \quad (4-4)$$

式中, $L_r(v_i) = p(\text{size}(S(t)) > F_b(v_i))$,是由于剩余缓冲不足所造成的丢失率,当业务分组的大小超过剩余缓冲空间时,就会发生分组丢弃,对某个确定时刻的节点 v_i , $L_r(v_i)$ 是一个确定的值。

剩余的缓冲空间为:

$$F(P) = \min \{F_b(v_i) | i = 1, 2, \dots, k-1\} \quad (4-5)$$

剩余缓冲空间可用来预测该路径的下一时刻可以承受的最大流量,可用在流量控制的算法中。

$er(v_i, v_{i+1})$ 表示节点 v_i 和 v_{i+1} 之间的信道 $e_{i(i+1)}$ 的丢失率,它与节点之间所采用的信道与通信环境密切相关,由于战术通信系统的电台一般都具有较强的编码与纠错能力,因此在实际计算时, $er(v_i, v_{i+1})$ 表示进行了纠错之后的信道丢失率,它与物理信道的传播环境密切相关。

综合式(4-2)~式(4-5)的分析,在忽略一些次要的因素,仅从战术通信系统对业务所提供的性能考虑,对系统整体性能产生的影响出发,战术通信系统可以简化为以节点 v_i 和边 e_{ij} 的属性为参数的有向图,网络的性能是节点与边属性的函数。

边 e_{ij} 有3个属性:长度 l (km),媒体传播速率 tr (km/s),不可纠误码率 er ,它们综合反映到时延、可利用的信道带宽以及误码率上。在战术通信系统中,节点位置在动态变化,因此时延、可利用的信道带宽以及误码率都是一个随着边的属性变化的函数,而这些函数的表达式就代表了信道的特性,对它的计算就是对信道的建模。

节点 v_i 的属性有: v_i 的平均服务速率 λ_{v_i} (bit/s),它与节点的拓扑关系、负载大小、缓冲空间以及信道出口速率等都有关系;分组丢失率 $L_r(v_i)$,它与节点的流量控制策略、媒体接入协议等有关。由于战术通信系统在使用时是一个拓扑与节点状态都动态变化的网络,因此节点的属性都反映到节点的时延函数 D_n 、节点分组丢失率函数 L_r 上。因此在对战术通信系统的节点进行建模时,应着重关注这些函数的建模。

对于需要分析的某一特定网络,得到所需的边和节点的函数是进行网络性能分析的关键。把这些函数代入战术通信系统的仿真网络模型中,结合业务流的特征参数,就可

以对网络业务流的吞吐量、时延和分组丢失率等关键参数指标进行分析。而这些函数就是战术通信系统仿真建模中所必须关注的方面。

综上所述,在战术通信系统仿真建模时,以下方面将会对系统整体性能产生直接或间接的影响,这是仿真建模的主要工作。

(1) 节点

网络层:路由算法——影响节点之间所选择的路径,从而影响整体性能;

流量控制算法——影响分组排队时延与分组丢失率;

链路层:媒体接入协议——影响排队的时延与占有的信道带宽;

差错控制——影响丢失率与实际可提供的信息速率;

物理层:信号处理模型——物理层的收发性能影响丢失率。

(2) 边

信道传输模型——影响丢失率;

移动模型——影响拓扑结构,从而影响选择的路径。

4.1.2 模型结构

根据 4.1.1 节所确定的仿真建模方法,战术通信仿真系统的建设途径是:首先建立节点与链路的模型,通过对节点与链路模型的组合使用,构建战术通信系统网络拓扑,采用分布式半实物仿真的方法,设置符合战术通信系统作战应用需要的仿真场景,并进行仿真,获得需要的网络性能指标。

战术通信系统模型结构采用分布式、开放式和交互式方式进行构建,构成可互操作、可移植、可伸缩及强交互的分布式半实物仿真体系平台,通过建立通用的数学模型与仿真模型,从而构成通用的仿真平台,通过对平台的扩展与修改,以适应不同战术通信系统应用的需要。

在模型的设计方法上,采用顶层设计的方法,先建立系统总体模型,然后对系统总体模型进行层层分解,最后确定具体模型的约束条件。同时仿真系统不仅仅作为某一方面的应用而建立,因此在构建仿真时将把系统的通用性与多功能性作为模型设计的重要考虑因素。

根据前面的分析,战术通信仿真系统的模型可分为两大类,节点模型与边模型。节点模型由对战术通信系统整体性能产生影响的各种协议按照它们的层次结构与相互关系构成,它与战术通信系统的装备构成、性能密切相关,包括网络层模型、链路层模型以及物理层模型;边模型是节点之间的拓扑关系的一种描述,包括信道传输模型、地形模型以及移动模型等,它可以映射为节点物理信道的误码率或信号传输损耗,它与战术通信系统的实际运用密切相关。

作战业务模型与边模型是战术通信系统与其他系统区别的一个重要方面。战术通信系统业务层模型与网络的组织运用、执行的任务以及网络接入的节点级别等都有关系,同一节点在不同的时间与不同的组织运用模式下的业务可能是不同的。战术通信系统的边模型不仅包括信道传输模型、地形模型、移动模型等,而且还包括敌方恶意的干扰模型等,但它的影响最终可映射为对节点物理传输性能的影响。节点模型是对战术通信系统装备特性的一种描述,边模型与业务模型是对战术通信系统组织运用过程动态特性的一种描述。但业务模型总是与节点模型成对出现的,而边模型也可以映射到节点的物理层的特性上,因此也把它作为节点模型的一个组成层次,以简化仿真系统的模型结构。

节点各层协议都有自己的数学模型和输入输出,模型会根据输入参数的不同而得出不同的输出结果,而层与层之间采用数据进行驱动。对协议进行建模,首先要分析和研究战术互联网分层的体系结构,根据研究结果建立各层协议和处理过程的数学模型,确定各层协议和处理过程的变量、变量间的相互关系以及约束条件,将它们用数学的形式表述出来,并确定其中的参数,构成各自的数学模型。所建立的数学模型是对协议的那些与研究目的有关的基本特性的抽象,即利用数学模型所描述的变量,并且作用关系必须接近于真实系统。同时,数学模型的复杂程度应当适中。模型过于简单,可能无法真实完整地反应系统的内在机制;而模型过于复杂,可能会降低模型的效率,同时又增加了不必要的计算过程。采用分层并建模相应协议模型的主要原因有以下四点:

- 分层的建模方法和战术互联网分层的体系结构一致,能够充分体现战术通信系统的特征;
- 每个模型都有自己的输入输出,因此可以单独地改变某一模型的输入条件来检验网络的性能;
- 模型相互之间的关联采用数据驱动,相互之间相对独立,耦合性不强,使用起来比较方便;
- 由于模型相对独立,因此方便使用和组合,如选择不同的模型则可以组成不同的节点模型,适应战术通信系统装备发展与应用发展的需要,也方便新技术和新协议的开发和验证。

根据这些分析,战术通信系统的模型结构如图 4.2 所示。

战术通信模型是节点、节点之间关系以及节点运行环境的集合,由节点模型与边模型构成,而节点模型则由作战业务模型、网络交换模型、数据链路模型、物理信道模型构成,边模型映射到物理信道模型之中。业务模型与网络交换模型之间交互的是业务数据,网络交换模型与数据链路模型之间交互的是分组数据,数据链路模型与物理信道模型之间交互的是数据帧,这与真实的网络系统是一致的。节点模型也可采用半实物模型代替,通过半实物接入系统接入仿真系统,形成一个半实物仿真系统,对系统的设计结

果进行验证。

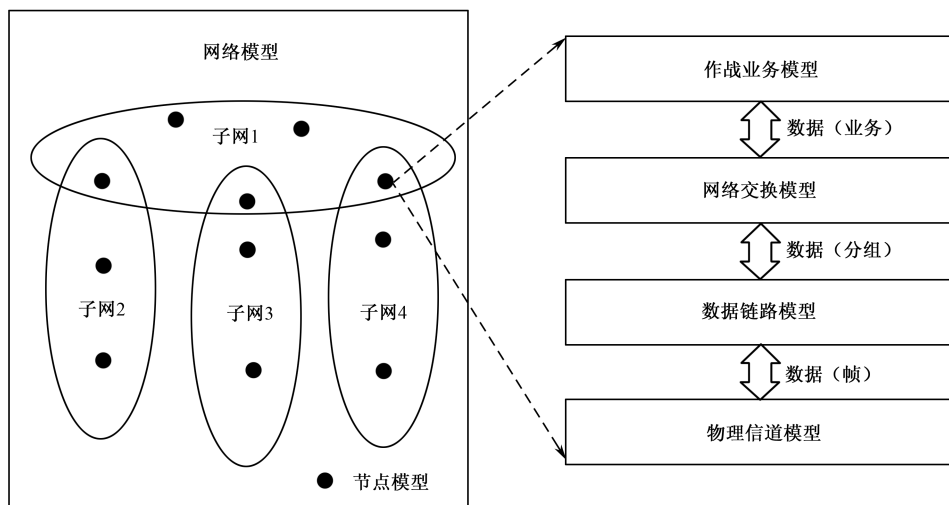


图 4.2 仿真系统的基本框架

各层次模型的主要组成如下。

1. 作战业务（应用层）模型

作战业务建模是对战术通信系统所承载的各种业务及其业务分布进行建模，它是进行性能统计的基础。业务模型的准确性是战术通信系统性能评估的关键所在。如果要想获得对战术通信有指导意义的结果，那么用于仿真的业务源必须能够正确反映实际战术业务的统计特性。业务建模主要根据在战术通信系统的作战使用中业务产生的特点，建立相应的模型来模拟产生业务流，并加载到网络中。根据分析，可以将战术通信系统中的业务分为三种：周期性业务、突发性业务、话音业务，因此业务层模型也就包括：

- 周期性业务模型；
- 突发性业务模型；
- 话音业务模型。

每一个模型都有自己的输入/输出参数，使用时，可以输入相应的参数，来检验网络的性能，对于下面的网络层模型、数据链路层模型、物理层模型也是一样，也可以选择输入参数。加载业务时，可以选择一种业务模型加载到节点模型，也可以选择多种业务模型同时加载到节点模型，并配置业务模型的输入参数。在为不同的节点模型选择业务模型和输入参数后，对于由节点模型构成的网络模型来说，就为其输入了整个网络的业务。

2. 网络交换模型

网络交换模型用于对战术通信系统的网络层功能进行仿真。从对整体性能的影响来看,路由算法与分组排队转发算法都会对时延、丢失率等产生影响,因此网络层建模主要集中在路由算法与流量控制算法上。在战术通信系统装备中,根据路由域的划分,可能有多种路由协议存在,但究其本质来说,路由协议采用的算法都是距离矢量或链路状态算法的不同实现。分组排队转发算法通过流量控制模型来实现。

网络交换模型包括路由算法模型和流量控制模型,路由算法模型包括:

- 距离矢量路由算法模型;
- 链路状态路由算法模型。

流量控制模型包括:

- 令牌漏斗算法模型。

3. 数据链路模型

数据链路层的主要功能是在不太可靠的物理链路上实现可靠的数据传输以及解决多个用户如何高效共享一个物理链路的技术,它主要是根据战术通信系统中链路层协议的设计而实现的。因此,它对战术通信系统的业务可靠传输和系统容量研究具有重要的意义。按照战术通信系统通信链路的功能与仿真建模的需要,将链路划分成两个模块:逻辑链路层协议模型和媒体接入控制协议模型。逻辑链路层协议模型主要对差错控制以及编码方式等进行建模,它对系统整体的丢失率、信道实际可用带宽等产生影响;媒体接入控制协议模型则对信道的占有方式进行建模,它对系统整体试验、吞吐量等产生影响。所以数据链路模型分为:逻辑链路层协议模型和媒体接入控制协议模型。

逻辑链路层协议模型包括:

- 连续 ARQ 协议模型。

媒体接入控制协议模型包括:

- TDMA 协议模型;
- CSMA 协议模型;
- 令牌环协议模型。

4. 物理信道模型

战术通信系统中节点之间的信息传输要依靠物理信道,而电波的传播要受到各种因素的影响,如电波的频段、地形环境、天气环境、噪声、节点移动,对于不同的信道物理层应采用不同的处理方法,来保证数据的传输。因此,对物理层的研究是整个战术通信仿真系统的关键。将物理层模型分为:移动模型、地形模型、干扰模型、传播模型、物理层处理模型。因此物理层模型包含了物理链路模型与通信环境模型,即将边模型也

映射到物理层模型之中,以简化仿真系统的建设难度。其中通信环境模型主要包括移动模型、地形模型、干扰模型、传播模型,地形模型、干扰模型,与特定的战术应用有关,在仿真时直接导入。

移动模型根据战术通信系统中节点移动的特点而定,本系统采用狭长的组移动模型作为战术通信系统节点的移动模型。节点的移动主要带来无线传输的损耗,因此在后面将它的影响隐含在无线传播模型中。

无线传播模型包括:

- 短波(HF)信道的无线传播模型;
- 超短波(VHF 频段)信道的无线传播模型;
- 超短波(UHF 频段)信道的无线传播模型;
- 微波信道的无线传播模型。

物理层处理模型包括:

- 接收功率计算模型;
- 噪声功率计算模型;
- 误码率计算模型。

4.1.3 模型关系

在 4.1.2 节的模型框架下,各模型之间的关系与它们对总体性能指标的影响关系如图 4.3 所示。

在图 4.3 中,各层次模型之间的相互依赖关系并不严格对应,只是从仿真系统的角度对关系简化或综合后的结果,目的是为了把精力更好地集中在影响网络整体性能的模型,以及如何利用这些模型完成对装备建设与应用需求的研究上。

在节点的层次模型中,物理信道模型包括物理处理模型与信道的无线传播模型,其中无线传播模型与战术通信系统使用的地形环境、信道频率、节点分布、网络组织关系、节点运动等都有关系,通过无线传播模型,可以确定信道的特性与节点间的动态相邻关系,同时它会产生传输时延 D_{e_i} 。而物理层处理模型主要对信道进行收发处理,会对业务产生误码率,并提供物理信道带宽等参数,误码率由链路模型处理,物理信道带宽用于媒体接入协议对信道进行分配,同样,它会产生发送时延 D_{e_i} 。其中 $D_e(v_i, v_{i+1}) = D_{e_i} + D_{e_i}$ 。

数据链路模型中,根据物理层提供的信道带宽参数,媒体接入控制协议模型对信道进行分配,产生本节点可以使用的信道带宽,称为可用带宽,这也是本节点的最大带宽 $C(e_{i(i+1)})$,同时媒体接入会产生接入时延 D_{n_m} 。逻辑链路层协议模型则对误码进行差错控制处理,同时进行纠错编码,因此会对可用带宽产生影响,使可用带宽转变为网络层可

以使用的通信速率,不同的纠错编码方式其通信速率是不同的,经过纠错处理后,误码率就变为不可纠丢失率 $er(v_i, v_{i+1})$ 。链路层的重传也会产生时延,这部分时延本文不作深入研究,可映射为接入时延。

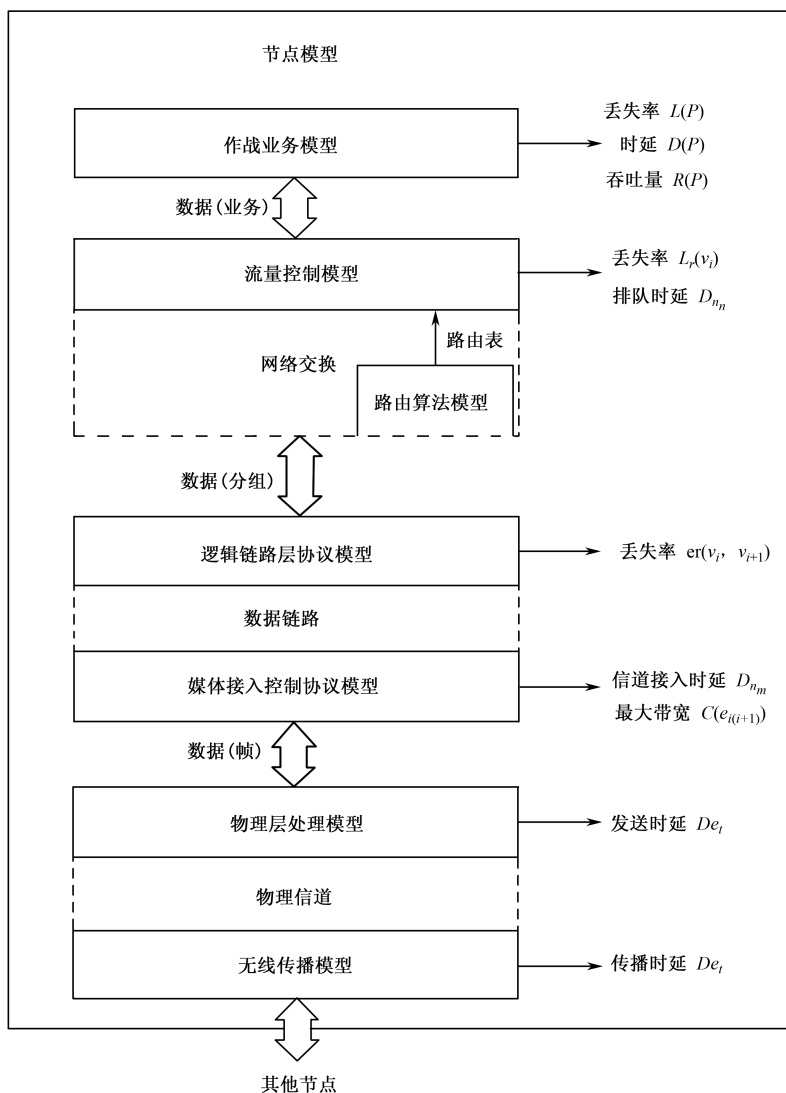


图 4.3 层次模型之间的关系

网络交换模型中,路由算法模型在拓扑关系与通信代价的基础上,对路由进行计算,产生用于数据转发的路由表,并进行路由协议的维护,拓扑关系的产生与维护不同的协议模型会有不同的处理方式。流量控制模型则根据所到达的分组的等级与本节点所承担的转发业务情况进行排队,并根据路由表所选择出的路径进行分组转发。流量控制模型会产生分组丢失率 $L_r(v_i)$ 与排队时延 D_{n_i} , $D_n(v_i) = D_{n_i} + D_{n_m}$ 。

作战业务模型则使用网络层提供的信息速率等参数发送业务，并把业务服务等级通告给流量控制模型。

节点模型是各层模型的有机组合，各层模型的不同组合、配置可获得不同的节点模型，多个节点模型的有机组合构成了战术通信仿真系统，通过配置不同的仿真场景，可以进行不同的仿真试验，满足不同的仿真任务的需要。

4.2 协议模型

为了将精力关注于怎样更好地使用仿真手段为战术通信系统装备建设服务，对战术通信系统仿真建模的内容进行了简化，只关注影响网络总体性能的网络层次协议模型。因此，协议建模是战术通信系统仿真的核心。网络协议描述了各节点、链路组成的通信网络通道中数据的传输方式，相同网络拓扑结构的网络会因协议的不同而可能导致通信性能的巨大变化；同样，网络仿真的结果是否符合真实情况在很大程度上取决于协议建模的优劣。

无线通信网络仿真一般涉及应用层、网络层、数据链路层与物理信道层，对这四层的协议进行仿真构成了网络协议仿真的基础。应用层、网络层、数据链路层与物理信道层中，每层都包含几种具体的协议，在通信网络仿真中选择具有代表性的协议进行建模。根据通信网络协议本身的特点，采取层次化、模块化的思想对协议进行建模。各层之间通过数据包进行通信，将各层串联起来，而每层都采用模块化的思想进行构建，模块之间、层与层之间都相互独立。因此，下面将在业务层、网络层、数据链路层与物理信道层中选择典型的协议对战术通信系统进行建模。

4.2.1 物理信道模型

1. 模型描述

影响战术通信系统无线信号的传输质量主要有地形环境、气候环境，以及节点的移动，而这些因素将引起无线信号在传输过程中不同程度的衰减，在无线移动通信系统中通常采用路径传播损耗来进行衡量。另外，在无线通信环境中，由于存在邻道干扰、同频干扰、噪声干扰等，因此战术通信系统的收发信机中要能够排除干扰，获取正确的信号，不同类型的电台其物理层处理也完全不同。综上所述，战术通信系统的物理信道建模的主要内容包括：节点移动模型、无线传播模型、物理层处理模型。由于战术通信系统使用短波、超短波、微波等手段进行通信，而不同的频段其传播特性也各不相同，因此在无线传播模型中要根据不同的传输手段进行分别建模。同理，对于不同的

通信手段, 其收发信机的输入参数也是不同的, 因此在使用物理层模型时, 要根据电台的类型进行确定。

2. 节点移动模型

在战术通信系统中, 由于作战角色和作战使命以及编制的约束, 单个移动节点的运行方式和状态依赖于组内其他节点, 常呈现出“组移动”的特征且组内节点通常分布在相对狭长的地带。这样, 在战术通信系统中, 重要作战角色和作战使命的节点作为参考点, 它的移动将影响其他所有节点的移动, 参考点采用 Random Waypoint 模型产生运行路线。对战术通信系统中的组移动建模使用狭长的组移动模型, 每个组的运动决定于该组的逻辑中心, 也就是参考点。狭长的组移动模型与参考点组移动模型的不同在于: 当参考点以运动矢量 \overrightarrow{GM} 从位置 $RP(\tau)$ 运动到 $RP(\tau+1)$ 后, 组内其他节点与参考点之间的偏移矢量 \overrightarrow{RM} 的选取规则不同。这样, 狭长的组移动模型与参考点组移动模型就表现出不同的组内节点分布图。

如图 4.4 所示, 当参考点从 $RP(\tau)$ 运动到 $RP(\tau+1)$ 后, 组内节点分布在以参考点为中心的矩形中。定义 r 为偏移矢量 \overrightarrow{RM} 的长度, 当节点的 r 确定后, 该节点分布在图中 x 轴上方或下方矩形中的概率相等, 现在只讨论节点分布在 x 轴上方矩形内的情况。令 θ 为 \overrightarrow{RM} 与 \overrightarrow{GM} 的夹角, θ 的取值范围为 $[-\theta_{\max}, \pi - \theta_{\min}] \cup [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, 其中 $0 \leq \theta_{\min} \leq \theta_{\max} \leq 2$, 从图中可以看出, 大的 r 对应小的 θ_{\max} 和大的 θ_{\min} , 这是由矩形中节点与矩形中心点相对分布关系所决定的。

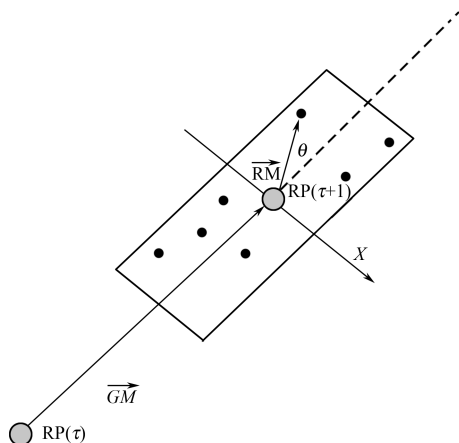


图 4.4 狭长的组移动模型

根据上面的分析, 假设狭长的组移动模型的组内节点分布在长为 $2b$ 宽为 $2a$ 的矩形中, 则偏移矢量 \overrightarrow{RM} 的长度 r 服从 $[0, a+b]$ 的均匀分布, θ_{\max} 和 θ_{\min} 均为长度 r 的函数, 定义为:

$$\theta_{\max}(r) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & r \leq a \\ \arcsin \frac{a}{r}, & a < r \leq \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases}$$

$$\theta_{\min}(r) = \begin{cases} 0, & r \leq b \\ \arccos \frac{b}{r}, & b < r \leq \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (4-6)$$

3. 无线传播模型

(1) 短波信道无线传播模型

由于短波具有通信距离远、短波通信设备顽存性强，因此仍在无线战术通信系统中使用。短波的频率范围是 3~30MHz，其传播主要依靠电离层反射，而电离层要吸收电磁波的传播能量。另外，短波通信还存在多跳的情况，即电波会经过电离层和地面来回反射，到达接收点，这样地面也会吸收电磁波的传播能量。因此，在对短波信息的路径损耗进行建模时，要充分考虑地面和电离层对传播能量的吸收。

在短波无线传输中，能量的损耗主要来自四个方面：自由空间传播损耗、电离层吸收损耗、多跳地面反射损耗、额外系统损耗，因此可用下式作为短波信道的无线传播模型：

$$L_M = L_{bf} + L_a + L_g + L_p \quad (\text{dB}) \quad (4-7)$$

式中， L_{bf} 表示自由空间传播损耗， L_a 表示电离层吸收损耗， L_g 表示多跳地面反射损耗， L_p 表示额外系统损耗，其单位都是 dB。

① 自由空间传播损耗计算

$$L_{bf} = 32.448 + 20 \lg f + 20 \lg d \quad (\text{dB}) \quad (4-8)$$

式中， f (MHz) 表示发射频率， d (km) 表示传播距离。

② 电离层吸收损耗计算

在工程计算中常采用半经验模式计算电离层吸收损耗，公式如下：

$$L_a = \frac{677.2 \sec \theta_0}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \sum_{j=1}^n I_j \quad (\text{dB}) \quad (4-9)$$

式中， n 表示跳数， θ_0 表示 100km 处的入射角， f_H 表示 100km 处磁旋谐振频率的平均值 (MHz)， I_j 表示吸收系数，其中：

$$I_j = (1 + 0.0037 R_{12}) \cos(0.881 x_j)^{1.3} \quad (4-10)$$

式中， x_j 为穿透吸收区的太阳天顶角平均值， R_{12} 为 12 个月太阳黑子的流动平均值。当 $f > 6\text{MHz}$ 时，式 (4-9) 可简化为：

$$L_a = \frac{615.55 \sec \theta_0}{(f + f_H)^{1.98}} \sum_{j=1}^n I_j \quad (\text{dB}) \quad (4-11)$$

③ 多跳地面反射损耗计算

$$L_g = 10 \lg \left(\frac{|R_v|^2 + |R_h|^2}{2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4-12)$$

式(4-12)为多跳地面反射损耗的计算公式,其中 R_v 表示垂直极化反射系数, R_h 表示水平极化反射系数。

④ 额外系统损耗计算

额外系统损耗包括电离层偏移吸收损耗、极化损耗等,它不是一个稳定的参数,其数值与地磁纬度、季节、本地时间都有关系。在工程计算时,通常使用经过反复校核的统计值来进行估算,表4-1所示为一个额外系统损耗估计值与时间关系的对照表,表中的时间为反射点的本地时间。

表 4-1 额外系统损耗估计值

本地时间	L_p (dB)
22 时至 04 时	18
04 时至 10 时	16.6
10 时至 16 时	15.4
16 时至 22 时	16.6

(2) 超短波信道无线传播模型

由于地表面面对超短波的吸收严重,同时也由于超短波对电离层的穿透能力强,所以超短波难以地波和天波传播,而主要以直射方式传播。另外,超短波能够利用大气团的散射和绕射实现“超视距”传播,但是频率越高,绕射能力也就越差。在进行超短波信道的路径损耗建模时,要注意天线的高度,因为有些传播模型是有天线高度限制的。

在选择超短波信道的无线传播模型时,要充分考虑模型的使用范围,包括频率、距离、天线高度、地形的使用范围,以及战术通信系统的通信环境和网络设备。在战术通信环境中超短波电台天线增益一般考虑为1。

① Okumura 模型

Okumura 模型是由大量实测资料形成的,它以准平坦地形大城市地区的路径损耗为基准,对于不同的传播地形和地形条件等因素用校正因子加以修正,使之适用于不同的地形环境。

$$L_M = L_{bf} + A_m(f, d) - H_b(h_b, d) - H_m(h_m, f) - k_s - k_h - k_A - k_{is} \quad (\text{dB}) \quad (4-13)$$

上式为修正的 Okumura 模型。 L_{bf} 为自由空间路径损耗,其值可由式(4-8)求得; $A_m(f, d)$ 为大城市中当发射天线高度 $h_b = 200\text{m}$,接收天线高度 $h_m = 3\text{m}$ 时,相对于自由空间的中值损耗; $H_b(h_b, d)$ 为发射天线高度增益因子(dB); $H_m(h_m, f)$ 为接收高度增益因子(dB); k_s 为郊区修正因子, k_h 为丘陵修正因子, k_A 为斜坡地形修正因子, k_{is}

为水陆混和传播路径修正因子。这些修正因子可由图表查出。

② Egli 模型

Egli 模型是根据在不规则地形环境中大量实测数据总结出来的经验公式：

$$L_M = 117 + 20 \log f - 20 \log(h_1 h_2) + 40 \log d \quad (\text{dB}) \quad (4-14)$$

式中, f 为发射频率 (MHz), h_1 和 h_2 分别为收发天线高度 (英尺), d 为通信距离 (海里)。

③ Lee 模型

Lee 模型适用于市区和郊区的经验模式, 它预测用 dBm 表示的接收功率 P_r :

$$P_r = A - B \log d - n \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha \quad (4-15)$$

式中, d 是收发天线之间的距离 (km), f 是频率 (MHz), 参数 A 和 B 取决于环境特性。

因子 n 有下面的值:

$$n = \begin{cases} 2 & \text{在郊区且 } f < 450 \text{ MHz} \\ 3 & \text{在市区且 } f > 450 \text{ MHz} \end{cases}$$

参数 α 为:

$$\alpha = \frac{h_t^2 h_r^m P_t G_t G_r}{3660}$$

式中, h_t 和 h_r 分别为收发天线的高度 (m), P_t 是发射功率 (W), G_t 和 G_r 分别是收发天线的增益, m 的值取决于天线的高度:

$$m = \begin{cases} 2 & h_r > 10 \text{ m} \\ 1 & h_r < 3 \text{ m} \end{cases}$$

(3) UHF 信道无线传播模型

在 0.3~3GHz 范围内的频率称为超高频, 这个频段的电磁波的传播基本上以视距传播, 但它可以利用对流层的大气团的散射作用, 实现超视距传播。由于 UHF 信道的特征满足 Okumura 模型、Egli 模型、Lee 模型的输入条件, 因此可以使用它们对其信道的路径损耗进行建模, 但要注意输入参数的变化。

(4) 微波信道无线传播模型

微波的传播是一种视距传播, 其传播比较稳定, 但其传播要受到大气折射和地面反射的影响。微波信道的路径损耗来自于三个方面: 自由空间传播损耗、大气吸收损耗、地面吸收损耗。由于微波的传播是视距传播, 因此可以忽略地面吸收损耗。下式为微波信道的路径损耗计算:

$$L_M = L_{\text{bf}} + L_e \quad (\text{dB}) \quad (4-16)$$

式中, L_{bf} 为自由空间传播损耗, 可由式 (4-8) 得出; L_e 为大气吸收损耗, 该值可以通过查表获得, 该值与频率和天气有密切的关系。

(5) 传播时延计算

传播延时是数据包在无线链路中所经历的一部分延时。在无线链路仿真中, 考虑到无线电台的移动, 在数据包传输过程中, 发射电台和接收电台之间的传输距离可能发生变化。因此, 需要计算两个时延, 即传输开始时的传播时延和传输结束时的传播时延, 来逼近节点的移动特性。采用以下方法计算传播延时:

分别计算发射电台和接收电台之间传输开始和传输结束的距离。

传播开始时延=传输开始时收发信机间距离/电磁波传播速率。

传播结束时延= 传输结束时收发信机间距离/电磁波传播速率。

传播时延为传播开始时延和传播结束时延的平均。

4. 物理层模型

这里对物理层的建模, 不考虑其内部的调制解调、频率搬移、滤波、均衡等, 而是通过计算接收功率和噪声功率, 求出信噪比, 然后根据调制曲线, 获取该信噪比情况下的误码率, 再根据纠错门限来决定是否丢弃数据包。这种建模方法, 简化了物理层的处理过程, 比较适合网络级和系统级的建模。

(1) 接收功率计算

$$P_r = P_t * L_M * G_t * G_r \quad (\text{W}) \quad (4-17)$$

式(4-17)为信号接收功率的计算公式。式中, P_t 为发射功率(W), L_M 为传播路径损耗(dB), 可以根据具体的无线传播模型计算出; G_t 和 G_r 分别为发射天线和接收天线的增益。

(2) 噪声功率计算

噪声分为干扰噪声、背景环境噪声、背景热噪声三种方式, 其中干扰噪声主要来自于邻道干扰和敌方的破坏性干扰, 背景环境噪声和背景热噪声的噪声源主要来自于车载电台、其他电子器材的噪音, 以及天气情况的变化等。

① 干扰噪声功率计算

$$P_r^i = P_t^i * L_M^i * G_t^i * G_r * \frac{B_{\text{lap}}}{B_n} \quad (\text{W}) \quad (4-18)$$

式(4-18)为干扰噪声功率的计算公式。式中, P_t^i 表示干扰信号的发射功率, G_t^i 表示发射干扰信号的天线的发射增益, B_n 表示干扰信号的带宽, B_{lap} 表示干扰信号带宽与信号带宽 B_s 的重叠带宽。

② 背景热噪声功率计算

$$P_{\text{te}} = B_r * K * (T_c + T_e) \quad (\text{W}) \quad (4-19)$$

式(4-19)为背景热噪声的功率计算, 其中 B_r 为接收机的接收带宽, K 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T_c 和 T_e 分别表示背景环境温度和和设备温度, 单位绝对温度(290K)。

③ 背景环境噪声功率计算

$$P_c = \int_{B_r} p(f) df \quad (W) \quad (4-20)$$

式(4-20)为背景环境噪声的功率计算,其中 $p(f)$ 为背景环境噪声的功率谱密度, B_r 为接收机的接收带宽。

④ 噪声功率计算

$$P_n = P_r^i + P_c + P_{te} \quad (4-21)$$

式(4-21)为噪声功率的计算公式,它是干扰噪声功率、背景环境噪声功率、背景热噪声功率的和。在数据包的接收过程中,背景环境噪声功率和背景热噪声功率是不变的。

(3) 误码率计算

① 信噪比计算

$$SNR = 10 \lg P_r / P_n \quad (4-22)$$

式(4-22)为信噪比的计算公式。由于数据包的接收过程中,干扰信号的到达是随机的,所以干扰噪声功率也是变化的。因此,当接收数据包时,如果有干扰信号产生或消失,则重新计算信噪比。

② 总误码率计算

由于信噪比的计算是分段的,所以误码率的计算也是分段的。在战术通信系统中,由于存在不同的电台类型,而对于不同的电台,其选择的调制方式也是各不相同的。调制曲线是反映调制方式性能的一种手段,调制曲线的横轴为输入的信噪比,纵轴为误码率,即对某种调制方式来说,不同的信噪比输入则会有不同的误码率,这样就构成了调制曲线。这样,当前的信噪比为 SNR_i 时,则根据电台的调制曲线,获取该信噪比情况下的输出误码率 P_e^i 。下式为该时间段内的误码总数:

$$W_e^i = B * T * P_e^i \quad (4-23)$$

式中, B 为码元速率, T 为在数据包接收过程中保持该信噪比不变所持续的时间。如果此时误码率已经大于接收机的纠错门限,则直接丢弃该数据包,而不再进行后面的分段计算。

在数据包的整个接收过程中,假设信噪比计算了 N 次,则总的误码数为:

$$W = \sum_{i=1}^n W_e^i \quad (4-24)$$

根据式(4-24)可以求出接收数据包的总误码率:

$$P_e = \frac{W}{L} \quad (4-25)$$

式中 L 表示数据包的总长。然后根据信道的纠错门限 E_{th} 来判断是否接收这个数据包。如果 $E_{th} \geq P_e$ ，则接收数据包；如果 $E_{th} < P_e$ ，则丢弃数据包。

(4) 传输时延计算

传输延时是数据包在无线链路中所经历的一部分延时，它是包按信道速率发送所需要的时间。这个时间是数据包的第一个比特开始发送时间和最后一个比特发送时间之差，也是发信机处理数据包所用的仿真时间。这个过程信道处于忙状态。当该事件发生时，媒体接入层的数据包将在队列中等待，直到信道空闲才可发送下一个数据包。计算传输时延可以通过下列公式：

传输时延 = 数据包长度 / 数据传输速率

(5) 丢包率计算

这里计算的丢包率是数据包在无线信道的传输过程中，由于无线信道的特性，包括衰落和干扰等引起的信号的衰减，而低于收信机的接受灵敏度或大于收信机的纠错门限而引起的数据包的丢失。其计算公式如下：

丢包率：丢失的数据包 / (成功接收的数据包 + 丢失的数据包)

5. 模型的输入/输出

(1) 移动模型的输入/输出

图 4.5 所示为狭长的组移动模型的输入/输出，输入参数 (\vec{s}, a, b) 分别表示参考点的移动轨迹，矩形分布地带的长和宽。

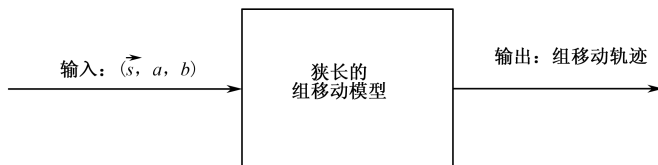


图 4.5 狭长的组移动模型的输入/输出

(2) 无线传播模型的输入/输出

短波信道模型的输入/输出如图 4.6 所示。

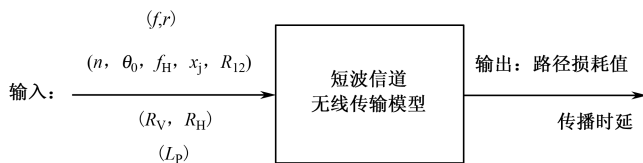


图 4.6 短波信道无线传播模型输入/输出

图 4.6 中,短波信道无线传播模型的输入共有 4 组,分别对应自由空间传播损耗计算、电离层吸收损耗计算、多跳地面反射损耗计算、额外系统损耗计算需要的输入参数。在进行电离层吸收损耗计算时,要根据输入的频率 f 来选择吸收系数的计算公式。

Okumura 模型的输入/输出如图 4.7 所示。在输入参数中要考虑实际设备的天线高度和使用的地形环境。

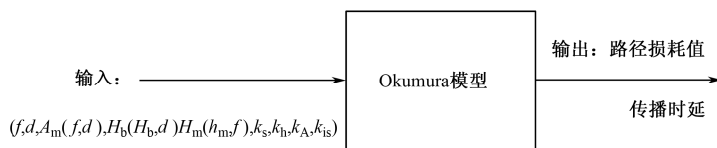


图 4.7 Okumura 模型的输入/输出

Egli 模型的输入/输出如图 4.8 所示。在输入参数中要考虑实际设备的天线高度。



图 4.8 Egli 模型的输入/输出

Lee 模型的输入/输出如图 4.9 所示。在输入参数中要考虑工作频率来确定 n , 以及使用的地形环境, 并通过查表确定 A 、 B 。

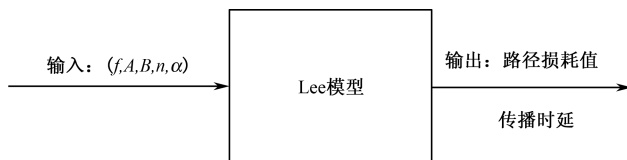


图 4.9 Lee 模型的输入/输出

微波信道模型的输入/输出如图 4.10 所示。输入参数 (f, d, L_e) 分别表示发射频率、传播距离、大气吸收损耗。

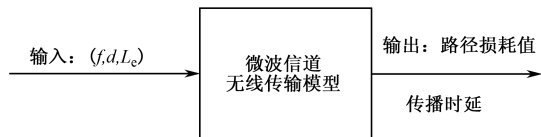


图 4.10 微波信道传播无线传播模型的输入/输出

(3) 物理层处理模型的输入/输出 (见图 4.11)

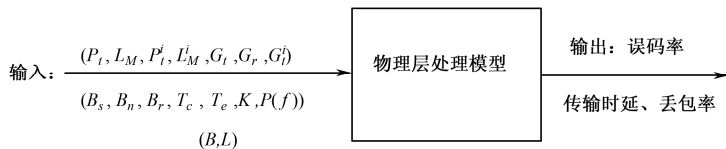


图 4.11 物理层处理模型的输入/输出

在战术通信系统中，由于 HF、VHF、WDR 电台的物理层参数都相差很大，所以在输入参数时，要根据电台的类型，选择输入相应的参数。

(4) 物理信道模型的输入/输出

物理信道模型的输入/输出如图 4.12 所示。使用时，要根据节点使用的通信手段选择相应的无线传播模型。无线传播模型要根据移动模型来动态地计算路径损耗值，并输入到物理信道模型，作为接收功率计算、误码率计算的依据。

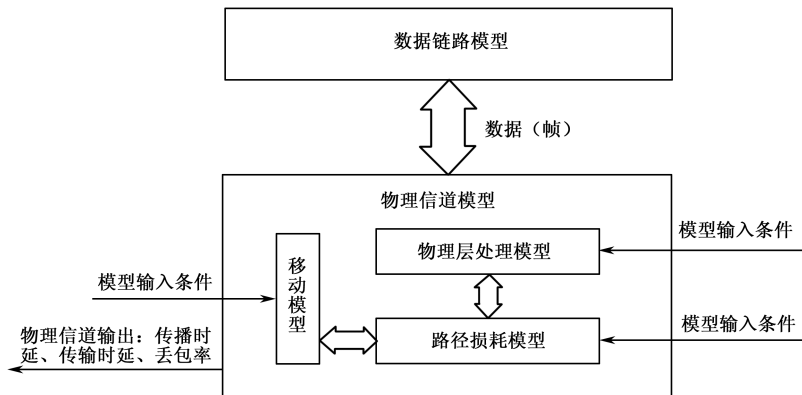


图 4.12 物理信道模型的输入/输出

4.2.2 数据链路模型

1. 模型描述

数据链路层的任务是提供两个相邻的网络节点之间，或者主机和节点之间的可靠通信。在数据链路层，发送端将报文分为帧发送，数据帧到达接收端后，根据校验结果向发送端发应答帧，发送端根据收到的应答帧的内容来决定是继续发送还是重新发送。采用这种校验—应答—重发的模式可以进行差错控制。但也可能出现数据帧的重复和乱序问题，这还需要相应措施来解决。数据链路层的另一个功能是提供流量控制，它的目的是防止因发送端的发送速度超过接收端的处理速度而造成数据丢失或信道拥挤。另外，解决多个用户高效共享一个物理链路也是数据链路层的主要功能。

在战术通信系统中，由于采用不太可靠且开放的无线信道来传输信息，数据链路层

的功能就显得尤为重要，特别是在可靠传输和信道共享两个方面。因此这里主要对数据链路中的可靠传输和信道共享两个方面对数据链路层进行建模，将数据链路模型分为：逻辑链路层协议模型和媒体接入控制协议模型，分别解决可靠传输和信道共享两种技术。逻辑链路层协议主要分析连续 ARQ 协议；媒体接入控制协议主要分析：TDMA 协议、CSMA 协议和令牌环协议。

2. 逻辑链路层协议模型

逻辑链路层协议主要对连续 ARQ 协议进行建模。

(1) 连续 ARQ 协议的工作原理

连续 ARQ 协议的基本原理是：允许发送方在未获得接收方 ACK 之前发送多个数据帧，帧的个数由发送窗口 W_T 的大小决定；在接收方，对发送序号在接收窗口 W_R 之内的数据帧进行 CRC 校验，如果正确则交给上一层，否则发送否认帧；发送方每次发送一个数据帧后，启动超时计时器，如果数据帧超时或收到否认帧，则有两种方法处理所出现的错误：一种方法是退后 N 帧，重发超时帧或出错帧及其该帧之后的已经正确发送的若干帧；另一种方法是选择重传，仅重发出错的帧，而不是所有的后继帧。

(2) 连续 ARQ 协议的吞吐量分析

设节点 A 向节点 B 连续发送数据帧，节点 B 对节点 A 发送应答帧。

模型输入： l_f , C

其中： l_f 为数据帧长度 (bit)； C 为数据的发送速率 (bit/s)。

为了研究 ARQ 协议，对物理比特管道作如下假定：

- 在物理信道上传输的帧到达接收端前被时延了一个任意可变的时间；
- 帧在传输过程中可能会丢失，也可能出错；
- 帧到达的顺序与发送的顺序相同。

在不出现差错时，成功地发送一个数据帧所需的时间是 t_f ；当出现差错时，重发一个数据帧所需的时间设为 t_T ，这样，可以得出在连续 ARQ 协议的情况下，正确传送一个数据帧所需的平均时间 t_{AV} 为：

$$t_{AV} = t_f + (1-p) \sum_{i=1}^{\infty} i p^i t_f = t_f [1 + (\alpha - 1)p] / (1-p) \quad (4-26)$$

其中参数 $\alpha = t_T / t_f$ ， t_T 稍大于 $t_f + t_{out}$ 。

在发送节点处于饱和状态下，吞吐量的最大值是：

$$\lambda_{\max} = 1/t_{AV} = (1-p)/t_f [1 + (\alpha - 1)p] \quad (4-27)$$

而归一化的吞吐量为：

$$\rho = \lambda t_f \leq (1-p)/[1 + (\alpha - 1)p] \quad (4-28)$$

3. 媒体接入控制协议模型之 TDMA 协议模型

(1) TDMA 协议的工作原理

在 TDMA 中, 用户使用频谱的时间是按照时隙分配的, 在每个时隙, 只有一个用户允许发送或接收。这些时隙用循环的方式分配给每个用户, 而用户占用时隙的方式可以采用竞争接入或固定分配的方式。根据传输信息的不同, 时隙所含的具体内容和组成格式也是不同的, 因此可以将时隙分为两类: 一类是传输用户数据的, 简称业务时隙; 另一类是传输控制指令的, 简称控制时隙。而且, 在一个时隙长度 t 内, 不仅有同步信息、信令等内容, 还有时隙之间的保护时间。设保护时间为 t_b , 同步信息、信令信息等占用的时间为 t_s , 那么在一个时隙内传输数据的时间 t_c 为:

$$t_c = t - t_b - t_s \quad (4-29)$$

假定 N 个 TDMA 时隙构成一个时帧, 则 TDMA 时帧的长度 $T_f = Nt$, 具体的时帧长度可由具体的网络设计确定。在一个时帧内, 再划分业务时隙和控制时隙的个数。

(2) TDMA 协议的时延分析

在分析 TDMA 协议的时延性能时, 采用离散的马尔可夫链模型。一个分组成功传输至某一节点必须满足: (a) 在传输的时隙内信道机处于接收状态; (b) 在相同的时隙内没有其他的邻节点向该节点传输; (c) 当某节点的排队缓冲器内有分组等待发送时, 节点以某一概率发送; (d) 当重传缓冲器内有分组时, 以某一概率优先发送。根据离散的马尔可夫链模型, 网络所具有的状态由 (S_1, S_2) 表示。 S_1 表示节点在排队缓冲区和重传缓冲区内所有分组个数; $S_2=0$ 表示节点不处在重传工作状态, $S_2=1$ 表示节点处在重传工作状态。

在分析分层组织网络的性能时, 利用数学模型及一些参数对网络进行分析, 所用到的参数及数学符号分别为: T_{ij} 表示从节点 i 至节点 j 的业务矩阵; ϕ_{ij} 表示在节点 i 的排队缓冲区内一个分组向其邻节点 j 发送的概率, 节点 i 整个缓冲区内所有分组包括节点 i 产生的新分组和经节点 i 转发到节点 j 的分组, 那么有 $\sum_{j \in N_i} \phi_{ij} = 1$, N_i 为节点 i 所有的邻节点; A_i 表示在每个时隙节点 i 需要转发的业务; λ_i 表示每个时隙在节点 i 到达新分组的速率, 设其到达过程为周期性到达分布; γ_i 表示从节点 i 的邻节点到达节点 i 转发分组的平均到达率, 只有当节点 i 在某个时隙不发送时, 转发的分组才能成功到达; G_i 表示节点 i 在每个时隙平均发送的概率, 因此, $\gamma_i(1 - G_i) = A_i$; P 表示节点在工作状态时, 发送分组的概率; P_r 表示节点在重传状态时, 重传该分组的概率; α 表示节点在工作状态时, 成功传输的概率; β 表示节点在重传状态时, 成功传输的概率。

根据以上定义, 节点在网络中的工作状态转移过程为: (a) 当节点 i 在工作状态中有 1 次不成功的传输后, 这个不正确传输的分组就进入重传缓冲区中, 节点 i 进入重传工作状态。 (b) 在重传工作状态, 节点 i 在下一时隙以概率 $P_r(i)$ 传输重传缓冲区中的分

组。成功进行一次重传后, 节点 i 就进入工作状态或空闲状态。(c) 节点 i 在工作状态, 以概率 $P(i)$ 在下一时隙发送排队缓冲区中排在第一位的分组。不发送时, 即空闲状态, 节点 i 就处于接收状态。按照上面的分析, 利用网络的马尔可夫链模型进行推导得 P_{s_1, s_2} = 节点状态 (S_1, S_2) 的稳态概率,

$$S_1 = n, S_2 = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$$

状态变量的概率分布是三个单独的概率分布的结合式, 这时就需要进行变换来计算这些概率。在这种情况下, 采用相乘的变换。这里合适的变换方式就是所谓的矩量母函数, 它对一随机变量 n 的定义为:

$$G_n(Z) = \sum_{k=0}^{\infty} P(n=k) z^k$$

和通常的变换情况一样, 一旦求出了 $G_n(z)$, 就可以用展开的 $G_n(z)$ 为 z 的有限级数的系数来确定相应的状态概率。考虑三个状态概率的矩量母函数:

$$U(z) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{n,0} z^n, \quad V(z) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{n-0} z^n$$

节点的状态矩量母函数为

$$S(z) = P_{0,0} + U(z) + V(z)$$

对于节点可能处于的所有三种状态, $S(1)=1$, 在某一节点的平均排队长度为

$$\bar{L} = \left. \frac{dS(z)}{dz} \right|_{z=1} = S'(1)$$

根据马尔可夫链的状态转移图和状态转移概率可以得到

$$\begin{aligned} P_{0,0} &= 1 - \frac{(\lambda + \gamma)(P_r \beta + \bar{p} \bar{\alpha})}{PP_r(\beta + \beta r + \alpha \gamma)} \\ U(1) &= \frac{P_r \beta}{P \bar{\alpha} + P_r} (1 - P_{0,0}) \\ V(1) &= \frac{P_r \bar{\alpha}}{P \alpha + P_r \beta} (1 - P_{0,0}) \\ \bar{L} &= \frac{H(1)F(1) - H(1)(1)}{PP_r(\beta + \beta \gamma + \alpha \gamma)H(1)} \end{aligned}$$

式中, $H(1) = (PP_r \alpha + PP_r \beta)(\lambda + \gamma) + PP_r(\alpha \lambda - \beta \lambda)$, $F(1) = (P_r \beta + \bar{P} \bar{\alpha})(\lambda + \gamma)$ 。

为了计算出网络的平均延时, 需要计算出 α 和 β 的值, 在这里定义如下数学符号: ϕ_{ij} 为到达节点 i 的转发分组被传送至节点 j 的一个邻节点的概率; $P_s(i \rightarrow j)$ 为当节点 i 向邻节点 j 发送一个分组时, 成功传输的概率。因此, 可以得到

$$\begin{aligned}
P_s(i \rightarrow j) &= (1 - G_i) = (1 - G_j) \prod_{l \in N_{\text{jexcept}(i)}} (1 - G_l), \\
\Phi_{ij} &= \frac{\Phi_{ij}(1/P_s(i \rightarrow j) - 1)}{\sum_{n \in N_i} \Phi_{in}(1/P_s(i \rightarrow n) - 1)}, \\
\alpha_i &= \sum_{j \in N_i} \Phi_{ij}(P_s(i \rightarrow j)), \\
\beta_i &= \sum_{j \in N_i} \Phi_{ij}(P_s(i \rightarrow j))
\end{aligned}$$

由上述一系列公式，在计算网络的业务量与网络平均分组时延的关系时，采用迭代法进行。迭代过程如下：

$$\begin{aligned}
G_i^{(0)} &= 0.5(P(i) + P_r(i)), \forall(i), \\
P_s(i \rightarrow j) &= (1 - G_j) \prod_{l \in N_{\text{jexcept}(j)}} (1 - G_l), \forall(i, j), \\
\phi &= \frac{\Phi_{ij}(1/P_s(i \rightarrow j) - 1)}{\sum_{n \in N_i} \Phi_{in}(1/P_s(i \rightarrow n) - 1)}, \forall(i, j), \\
\alpha_i &= \sum_{n \in N_i} \Phi_{ij} P_s(i \rightarrow j), \forall(i, j), \\
\beta_i &= \sum_{n \in N_i} \phi_{ij} P_s(i \rightarrow j), \forall(i, j), \\
\gamma_i &= \frac{A_i}{1 - G_i^{(k)}}, \forall(i, j), \\
k+1 \rightarrow k, G_i^{(kl)} &= U_i(l)P(i) + V_i(l)P_r(i), \forall(i, j)
\end{aligned}$$

$|G_i^{(k)} - G_i^{(k-1)}| \leq 0.0001$ ， $\forall(i)$ 表示迭代了 k 步，结果已收敛，可以用来计算网络的平均时延为 $\sum \bar{L}_i / \sum \lambda_i$ 。

4. 媒体接入控制协议模型之 CSMA 协议模型

(1) CSMA 协议的工作原理

载波监听多路访问（CSMA）是进一步提高吞吐量的有效方式。这种方式适用于时延较小的总线网，现已普遍适用于局域网中。CSMA 系统中没有中心控制器，是一种完全分散的控制系统。用户信息从一个节点传送到另一个节点，首先要监听信道，根据信道的状态确定是否传送。载波监听指发送节点在发送信息帧之前，必须监听信道是否处于空闲状态。如信道忙，就暂不发送数据，从而减少了冲突的可能，提高了信道吞吐量。多路访问指多个用户共用一条线路，用户既可以接收其他节点的信息，用户发送的信息也可以被其他节点接收。

① 非坚持 CSMA

如果信道空闲就立即发送；如果信道忙，则等待一随机时间，然后重新开始发送过

程；若产生了冲突，则等待一随机时间，然后重新开始发送过程。减少了冲突的可能性，但增加了信道空闲时间，信息发送延迟加大，信道效率比 1 坚持 CSMA 低，传输延迟比 1 坚持 CSMA 大。

② 1 坚持 CSMA

如果信道空闲，就立即发送；如果信道忙，就继续监听，直到信道空闲，然后再次立即发送，但如果此时有两个或更多的节点同时发送信息，冲突就会发生。若发生冲突，则等待一随机时间，然后重新开始发送过程。减少了信道空闲时间，但增加了发生冲突的概率。

③ P 坚持 CSMA

P 坚持 CSMA 是非坚持 CSMA 和 1 坚持 CSMA 的折中，适用于时隙信道。如果信道空闲，就以概率 P 发送，以概率 $(1-P)$ 延迟一段时间 w （端到端的传播时延）发送，若下一个时隙仍空闲，则重复此过程，直至数据发出或时隙被其他节点占用；如果信道忙，则等待下一个时隙，重新开始发送；若发生冲突，则等待一随机时间，然后重新发送。假定网络中有 N 个节点，需要发送信息，信道此时忙。当信道空闲时，预计进行发送的节点为 NP 。如果 $NP > 1$ ，则将有冲突发生，于是就会重发，结果又产生了更多的冲突。因此必须保证 $NP < 1$ 。

(2) CSMA 协议的吞吐量分析

模型假定不发送干扰信号，争用期长度为 2τ （ τ 就是端到端的传播时延），即争用期可能达到的最大值。设系统共有 N 个节点，每个节点发送帧的概率为 p ，一个帧从开始发送，经冲突重发多次，到发送成功且信道转为空闲（即信道上无信号在传播）时为止，共需的平均发送时间为 T_{AV} 。用 A 代表某个节点发送成功的概率，则：

$$A = P[\text{某个节点发送成功}] = Np(1-p)^{N-1} \quad (4-30)$$

一个争用期的出现概率为 $1-A$ ，因此

$$P[\text{争用期为 } j \text{ 个}] = (1-A)^j A \quad (4-31)$$

争用期的平均个数即帧重发的次数 N_R ：

$$N_R = \sum_{j=0}^{\infty} j(1-A)^j A = (1-A)/A \quad (4-32)$$

由此求出网络的归一化吞吐量为：

$$S = \frac{T_0}{T_{AV}} = \frac{T_0}{2\tau N_R + T_0 + \tau} = \frac{1}{1 + a(2A^{-1} - 1)} \quad (4-33)$$

式中， $a = \tau/T_0$ 。

可以得出，要获得最大吞吐量，应使 A 值最大。将式（4-30）对 p 求极大值，得出当 $p = 1/N$ 时可使 A 等于其极大值 A_{\max} ：

$$A_{\max} = (1 - 1/N)^{N-1} \quad (4-34)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $A_{\max} = 1/e \approx 0.368$ 。

(3) CSMA/CD 网络效率的分析

影响网络效率的主要是冲突问题, 故分析冲突可能占用多少网络时间。吞吐量公式为 $S = Ge^{-2G}$, G 为业务量。当 $G=0.5$ 时, S 有一个最大值约为 $1/(2e) \approx 0.184$, 信道饱和。当 $G>0.5$ 时, 无法获得稳定工作点。

非持续型 CSMA/CD (无限用户):

$$S = (Ge^{-aG}) / [Ge^{-aG} + raG(1 - e^{-aG}) + 2Ag(1 - e^{-aG}) + (2 - e^{-aG})] \quad (4-35)$$

式中, $r = J/\tau$, τ 为传播周期。

非持续型时隙 CSMA/CD (无限用户):

$$\begin{aligned} S &= (aGe^{-aG}) / [aGe^{-aG} + ar(1 - e^{-aG} - aGe^{-aG}) + a(2 - e^{-aG} - aGe^{-aG})] \\ U &= 1 / [1 + 2a(1 - A)/A], \\ U_N &= 1 / (1 + 3.44a), \\ A &= (1 - 1/N)^{N-1} \end{aligned} \quad (4-36)$$

(4) CSMA/CD 网络延迟时间的分析

由 Tobagi-Hunt 的分析假设: 退避时间是由具有固定平均时隙的指数型分布选择的。每个工作站的缓冲器中只能容纳一个报文, 其延时特性为

$$D = N_1 / S \quad (4-37)$$

式中, S 为系统吞吐量, N_1 为整个周期内信道的平均积压站数。

(5) 退避策略分析

退避策略有动态退避策略、线性退避策略、固定分布型退避策略、固定平均指数型分布法。

CSMA, CSMA/CD 都有一个敏感周期 τ , 一般分析认为它是信道的最大端对端传播时延。

为了保证系统的稳定性, 可以采用以太网所用的截断二进制指数类型 (truncated binary exponential type) 的退避算法来决定重发帧所需的时延。这种退避算法是这样的: 首先从离散的整数集合 $[0, 1, \dots, 2^{k-1}]$ 中随机地取一个数, 设它为 r , 而 $k = \text{Min}[\text{重发次数}, 10]$ 。重发所需的时延就是 r 倍的基本退避时间, 基本退避时间要事先确定, 通常可取为 2τ (τ 就是端到端的传播时延)。当重发 16 次仍不能成功时, 丢弃该分组, 并向高层报告。

5. 媒体接入控制协议模型之令牌环协议模型

(1) 令牌环协议的工作原理

使用令牌环协议时，每个节点都与一个干线耦合器相连，其有两个工作状态。一种是发送方式；另一种是收听方式。

当干线耦合器处于收听方式时，其主要的任务是：

- 转发从环路输入的比特流。转发时先收下一个比特然后转发一个比特，这样做只造成 1 比特的延迟。在收听方式下，干线耦合器和接在干线耦合器上的站点实际上是断开的；
- 不停地监视以下两种特殊的比特流：第一种比特流组合是本站的地址，一旦发现现有本站的地址，就立即将其内部的连接方式改变，于是，环路输入的比特流就流入到与干线耦合器相连的主机；第二种特殊比特组合就是令牌，它平时不停地在环路上流动，当一个站有数据要发送时，必须先截获这个令牌。

当干线耦合器处于发送状态时，数据以帧为单位从干线耦合器的环路输出端发送到下一个干线耦合器的环路输入端。在单令牌体制下，整个环路只有一个站工作在发送状态，其他所有的站只能处于收听方式而不能发送数据，即只能将收到的比特流转发出去。

(2) 令牌环协议的时延分析

若环路上共有 N 个站点，每个站点在转发比特流时需时延 b bit（在最小时延时 $b = 1$ ），信道速率为 C ，整个环路的传播时延为 τ ，则整个环路的巡回时间是：

$$L = \tau + Nb/C$$

因此两个站之间的平均巡回时间应为 $L/2$ 。若平均帧长为 $1/\mu$ ，则一个帧的平均发送时间等于 $1/\mu C$ ，所以从一个源站到某个目的站的平均传送时延是：

$$T_f = \frac{L(1-\rho/N)}{2(1-\rho)} + \frac{N\lambda}{2\mu^2 C^2(1-\rho)} + \frac{1}{\mu C} + \frac{L}{2}$$

式中，通信量强度 $\rho = N\lambda/\mu C$ ， λ 是每个站的平均到达率。在整个环路负载很轻时，即 $\rho \rightarrow 0$ 时，

$$T_f \approx \frac{L}{2} + 0 + \frac{1}{\mu C} + \frac{L}{2} \quad \rho \rightarrow 0 \quad (4-38)$$

其中第一个 $L/2$ 代表截获令牌所需的平均时间，第二个 $L/2$ 是两个站点之间的平均传送时间。

6. 模型的输入/输出

(1) 逻辑链路层协议模型的输入/输出

逻辑链路层协议模型的输入/输出如图 4.13 所示。在使用时，可以根据战术通信系统

的要求选择相应的逻辑链路层协议。连续 ARQ 协议模型的输入参数 t_{out}, W_T ，表示超时定时器的设置和发送窗口的大小。

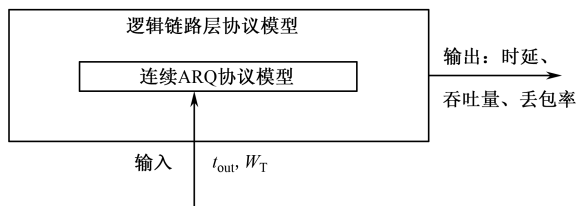


图 4.13 逻辑链路层协议模型的输入/输出

(2) 媒体接入控制协议模型的输入/输出

媒体接入控制协议模型的输入/输出如图 4.14 所示。使用时，选择并设置模型的输入参数即可。CSMA 协议模型的输入参数 p 表示在听到信道空闲时，发送数据的概率，而 τ 表示以概率 $(1-p)$ 延迟的时间。TDMA 协议模型的输入参数 $T, t_{slot}, N_d, N_p, N_s$ 分别表示：时帧的长度、时隙的长度、在一个时帧中数据信息占用的时隙数、在一个时帧中话音信息占用的时隙数、在一个时帧中控制信息占用的时隙数。令牌环协议的输入参数 L 表示令牌的长度， t_b 和 t_s 分别表示保护时间和同步时间。

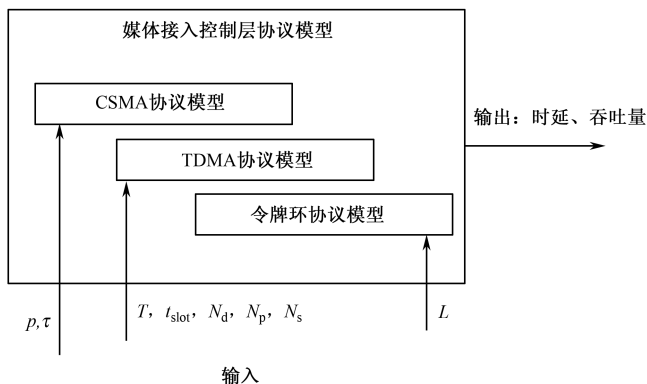


图 4.14 媒体接入控制协议模型的输入/输出

(3) 数据链路层协议模型的输入/输出

数据链路层模型的输入/输出如图 4.15 所示，该模型的输入分为两部分：一部分是将网络交换模型提交的数据分组封装成数据帧再发给物理层，以及该过程的逆过程；另一部分是数据链路层内部的协议选择，以及协议模型的输入参数。

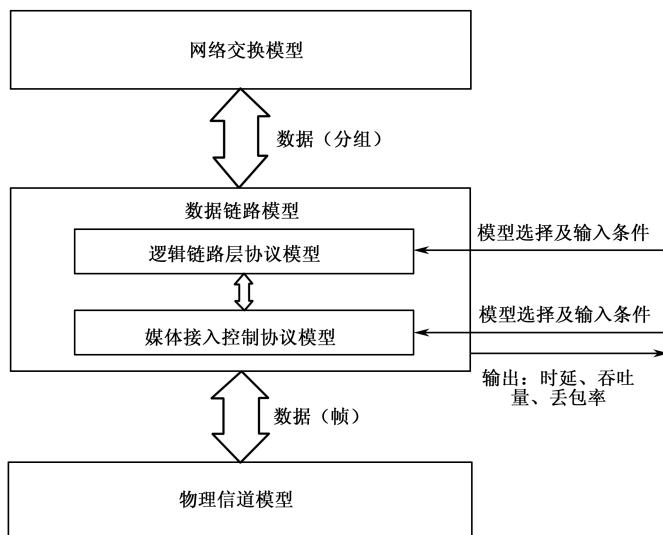


图 4.15 数据链路层模型的输入/输出

4.2.3 网络交换模型

1. 模型描述

网络交换模型主要完成分组寻路与转发功能，分组寻路主要与网络的路由算法模型有关，分组转发则主要与分组的排队或流量控制模型有关。

定义 4.1 图由一个非空的节点集合 V 和节点间的边集合 E 组成，可以写成 $G=(V, E)$ 。其中，边可以是无方向的，也可以是有方向的，如果有方向，则称图为方向图，否则称为无向图。

定义 4.2 给定图 $G=(V, E)$ ，设 $v_0, v_1, \dots, v_k \in V$ ， $e_0, e_1, \dots, e_k \in E$ ，且 $e_i (i=1, 2, \dots, k)$ 以 v_{i-1} 和 v_i 为端点（对有向图， v_{i-1} 为 e_i 的起点， v_i 为 e_i 的终点），节点和边的交替序列 $v_0 e_1 v_1 e_2 \dots e_k v_k$ 称为节点 v_0 到节点 v_k 的路径。若路径中的所有节点均不相同，则称此路径为基本路径。

定义 4.3 设图为 $G=(V, E)$ ，若对于 G 的每条边 e ，均有一个正实数 $W(e)$ 与之对应，则称 G 为赋权图，常记为 $G=(V, E, W)$ 。

在赋权图中，边的权称为边的长度，一条路径的长度是指这条路径中各条路径的长度之和。假设节点 m 和 n 之间共有 j 条基本路径，每条路径的长度分别为 W_1, W_2, \dots, W_j ，最短路径 D_{\min} 也就是长度最小的路径，可由下式表示：

$$D_{\min} = \min \{W_1, W_2, \dots, W_j\} \quad (4-39)$$

战术通信系统可以抽象为一个图，网络中的网络设备（如路由器、交换机、终端设

备等)可以抽象为图中的节点,网络设备之间的通信链路可以抽象为图中的边。而战术通信系统网络层的主要功能是根据分组寻路与转发,将用户的消息正确地送到目的节点,而分组则主要由网络的路由算法完成。因此,路由算法模型必须作为网络层中关键的建模对象,来寻找网络节点之间的最短路径。

另外,在战术通信系统中,每一个节点的存储容量和处理能力都是有限的,因此在进行分组转发时,当超过节点的存储和处理能力时,就会出现节点拥塞。通过对战术通信系统的分析得出,引起拥塞的主要原因是业务的突发性,如果网络节点以均匀的速率发送业务,则拥塞发生的频率将大大降低。因此,这里以令牌漏斗算法作为战术通信系统中的流量控制模型进行建模和分析。

2. 路由算法模型

假定在一个网络中,任一节点对 $w=(S,D)$ (S 为源节点, D 为目的节点)之间可以同时通过多条路径将输入到源节点的业务流 r_w 送到目的节点。设任一节点对 w 之间的所有路径集合用 P_w 表示,即 $P_w=\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 各条路径上的流量用 x_p 表示,则这些流量的集合用 X_w 表示,即 $X_w=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; 再令网络中所有节点对的集合用 W 表示。

根据定义,显然有

$$\sum_{p \in P_w} x_p = r_w \quad \text{对所有的 } w \in W \quad (4-40)$$

$$x_p \geq 0 \quad \text{对所有的 } p \in P_w, w \in W \quad (4-41)$$

即各条路径上的流量之和等于输入流量,并且各条链路上的流量一定大于等于零。

设链路 (i, j) 上的流量用 F_{ij} 表示,则

$$F_{ij} = \sum_{\substack{\text{包含 } (i, j) \text{ 的} \\ \text{所有路径 } p}} x_p \quad (4-42)$$

寻找最佳路由的目的就是使网络中的成本最低,即使式(4-43)最小

$$\sum_{(i,j)} D_{ij}(F_{ij}) \quad (4-43)$$

式中, D_{ij} 是一个单调的函数,它是每条链路的成本, F_{ij} 越大,成本越高。常用的成本函数为:

$$D_{ij}(F_{ij}) = \frac{F_{ij}}{C_{ij} - F_{ij}} + d_{ij} F_{ij} = \left(\frac{1}{C_{ij} - F_{ij}} + d_{ij} \right) F_{ij} \quad (4-44)$$

式中, C_{ij} 是链路 (i, j) 的容量, d_{ij} 是链路的时延(包括传播时延和处理时延)。

路由最佳化就是寻找最佳的 $X_w=\{x_p\}$, 使得成本函数最小,即

$$\left. \begin{array}{l} \text{目标函数} \quad \min \sum_{(i,j)} D_{ij} \left[\sum_{\substack{\text{包含 } (i,j) \text{ 的} \\ \text{所有路径 } p}} x_p \right] \\ \text{约束条件} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{p \in P_w} x_p = r_w \quad \text{对所有的 } w \in W \\ x_p \geq 0 \quad \text{对所有的 } p \in P_w, w \in W \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (4-45)$$

在战术通信系统中,经常使用距离矢量路由算法和链路状态路由算法来寻找端到端之间的特定条件下的最佳路径。

(1) 距离矢量路由算法模型

距离矢量路由算法是 B-F 算法的具体实现,而 B-F 算法是求最短路径的一种方法。

B-F 算法定义: 最短路径是指具有下列约束条件的从给定节点 i 到目的节点 j 的最短路径。①路径中最多包括 h 条边;②路径经过目的节点一次;③如果 (i, j) 不是图中的边,则令其权值 $d_{ij} = \infty$ 。

最短路径用 D_i^h 表示,对所有的 h , 令 $D_1^h = 0$ 。下面给出从 h 步路径中寻找最短路径的 B-F 算法:

$$D_i^{h+1} = \min_j [d_{ij} + D_j^h] \quad i \neq 1 \quad (4-46)$$

式中, d_{ij} 表示边 (i, j) 的路径长度, D_j^h 表示图中节点 j (包括源节点) 到达目的节点的最短路由。

在距离矢量路由中,每个节点维持一个路由表,表中包括到达网络中所有节点的信息项,该项共有两个部分:到达目的节点的输出链路;到达目的节点的距离估计值。距离的度量可以选择跳数、时延等。每隔 T 秒,每个网络节点会向它的邻居节点发送包含自己路由表中内容的分组,邻居节点会根据这个分组来更新自己的路由表内容。

(2) 链路状态路由算法模型

链路状态路由算法包括 5 个部分:

- ① 发现它的邻节点并取得它们的地址;
- ② 测量到达每一个邻节点的时延;
- ③ 构造一个分组来通告它所知道的所有路由信息;
- ④ 发送该分组到所有其他节点;
- ⑤ 计算到达每一个节点的最短路由。

链路状态路由算法采用 Dijkstra 算法来求得每一个节点的最短路径。设赋权图 $G = (V, E, W)$, Dijkstra 算法求从节点 v_1 到节点 v_n 的最短路径的基本思想是:将节点集 V 分为两部分,一部分是节点具有 p 标号(永久性标号)的集合 P ,另一部分是节点具有 t 标号(临时性标号)的集合 T ,并首先置 v_1 具有 p 标号,而其余节点具有 t 标号,然后逐步将 t 标号的节点置为 p 标号。当节点 v_n 具有 p 标号时,就找到了从节点 v_1 到节点 v_n

的最短路径。而在链路状态路由算法中, 节点 v_i 的 p 标号是指节点 v_1 到节点 v_i 的最短路径长度, 节点 v_j 的 t 标号是指节点 v_1 到节点 v_j 的某路径的长度。节点 v 的标号用 $L(v)$ 表示。

Dijkstra 算法描述如下:

① 初始化。设 v_1 获 p 标号, $L(v_1)=0$, $P=\{v_1\}$, $T=V-P$, 且 $v_j(v_j \in T)$ 的 t 标号是:

$$L(v_j)=\begin{cases} W(v_1, v_j) & \text{若 } (v_1, v_j) \in E \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (4-47)$$

② 求下一个节点的 p 标号。设节点 v_i 的 t 标号是 T 中所有节点 t 标号的最小值。将 v_i 的 t 标号改为 p 标号, 于是 v_i 获得 p 标号, 修改永久性标号集 P 和临时性标号集 T , 使 $P=P \cup \{v_i\}$, $T=T - \{v_i\}$ 。

③ 修改 T 中各节点的 t 标号值。对任意的 $v_j \in T$

$$L(v_j)=\min\{L(v_j), L(v_i)+W(v_i, v_j)\} \quad (4-48)$$

重复步骤②和③, 直到 v_n 获得 p 标号。

3. 流量控制模型

战术通信系统是一个带宽受限的通信系统, 因此流量控制模型的主要作用是根据链路带宽的限制, 对本节点的业务以及转发业务进行排队处理。战术通信系统要支持具有优先级的业务, 因此这里采用令牌漏斗算法模型。

(1) 令牌漏斗算法的工作原理

当一个突发分组到达时, 应当能够加速传输, 即允许输出的业务流可以有一定的突发性, 一个典型的算法就是令牌环漏斗算法。这时, 漏斗内注入的是令牌, 令牌产生的速率为每 ΔT 秒产生一个令牌, 漏斗的容量为 C 。当漏斗满时, 产生的令牌将丢失。而对数据分组而言, 它必须获得令牌后方可发生。

(2) 令牌漏斗算法的时延分析

漏斗中令牌的输出速率取决于用户的需求, 即每次可输出 $0 \sim W$ 个令牌。如果用户无需求, 则漏斗无输出。如果漏斗注满了 W 个分组并且输入突发超过 W 个分组, 则漏斗可输出 W 个令牌, 但后续令牌的输出速率仅为 $1/\Delta T$ 令牌/秒。

令牌漏斗算法的性能与令牌产生的间隔 ΔT , 漏斗容量 C 有密切的关系。但是在给定 ΔT 和 C 的情况下, 令牌漏斗算法的性能还要取决于分组的到达速率。下面以两种情况: 分组的长度固定和分组的长度可变, 来分析漏斗算法对分组进入网络的时延的影响, 而这两种情况也是符合战术通信系统中的业务特征的。

第一种情况: 固定分组长度

假定分组的长度固定, 分组的到达过程是速率 λ 的泊松过程, 令牌产生的间隔

$\Delta T = 1/r$, r 为令牌的产生频率, 令牌漏斗的容量为 C 。当漏斗满时, 产生的令牌将被丢失。

基于上面的假定, 则漏斗系统可看作一个离散时间的马尔可夫链, 其状态为 i , i 表示令牌的使用情况。当 $i = 0, 1, \dots, C$ 时, 它表示漏斗中还有 $C-i$ 个令牌可用, 且没有未获得令牌的分组在等待, 相当于漏斗中有剩余的空间; 当 $i = C+1, C+2, \dots$ 时, 则表示有 $i-C$ 个未获得令牌的分组在等待且没有令牌。状态转移发生在 $0, \Delta T, 2\Delta T, \dots$ 即刚好在令牌到后发生转移。

在 ΔT 内到达 k 个分组的概率为:

$$a_k = \frac{e^{-\lambda/\tau} (\lambda/\tau)^k}{k!} \quad (4-49)$$

状态转移概率为:

$$P_{0i} = \begin{cases} a_{i+1} & i \geq 1 \\ a_0 + a_1 & i = 0 \end{cases} \quad (4-50)$$

式 (4-50) 表示当前状态为 0 的状态转移概率, 其中, 第一项为 ΔT 内到达 $i+1$ 个分组的概率, 第二项对应 ΔT 内没有分组到达或到达 1 个分组的概率。

对于 $j \geq 1$, 其状态转移概率为:

$$P_{ji} = \begin{cases} a_{i-j+1} & j \leq i-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4-51)$$

可得状态转移图如图 4.16 所示。

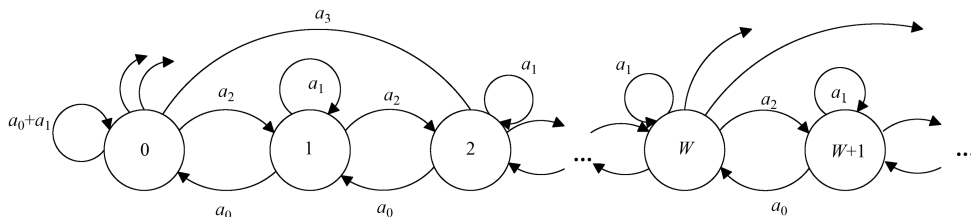


图 4.16 令牌漏斗系统的状态转移图

全局平衡方程为:

$$\begin{aligned} p_0 &= a_0 p_1 + (a_0 + a_1) p_0 \\ p_i &= \sum_{j=0}^{i+1} a_{i-j+1} p_j, \quad j \geq 0 \end{aligned}$$

式中, p_i 为状态 i 的概率。

这些等式可以通过递归的方式来求解, 即

$$\begin{aligned} p_1 &= a_2 p_0 + a_1 p_1 + a_0 p_2 \\ p_2 &= \frac{p_0}{a_0} \left[\frac{(1 - a_0 - a_1)(1 - a_1)}{a_0} - a_2 \right] \end{aligned}$$

依次类推, 可写出 p_3, p_4, \dots 的表达式。

另外, 在稳态的情况下, 令牌产生的平均速率 (对所有的状态进行平均) 应等于分组到达率 λ 。令牌产生的平均速率为 $(1 - p_0 a_0)r$, 则有

$$\lambda = (1 - p_0 a_0)r$$

$$p_0 = \frac{r - \lambda}{ra_0}$$

令牌漏斗系统中一个分组获得一个令牌的平均时延为

$$T = \frac{1}{r} \sum_{j=0}^{\infty} p_j \max\{0, j - C\} = \frac{1}{r}(j - C) \quad (4-52)$$

第二种情况: 可变分组长度

对于可变分组长度的漏斗算法, 设置令牌产生的速度可允许进入网络的比特流的速度为 r (比特/秒), 漏斗的容量为 C 比特。分组的长度服从指数分布, 其平均长度为 L 比特。

令 $\mu = r/L$, 则 $1/\mu$ 是以速率 r 传输一个分组的平均时间。 $c = C/r$ 为令牌可积累的时间, 则可以证明: 分组经过令牌漏斗系统的平均时延为

$$T = \frac{1}{\mu - \lambda} e^{-c(\mu - \lambda)} \quad (4-53)$$

式中, λ 为分组到达速率。

4. 模型的输入/输出

(1) 路由算法模型的输入/输出

图 4.17 所示为路由算法模型的输入/输出。使用时, 要为战术通信系统中的节点选择路由算法模型, 然后再输入算法模型的约束条件, 即度量标准 (如时延、跳数、带宽、平均通信量及这些参数的约束值), 以及其他节点的路由信息, 这些输入将作为路由算法计算的依据。路由算法模型的输出结果是路由表项, 表中包括到达网络中所有节点的信息。

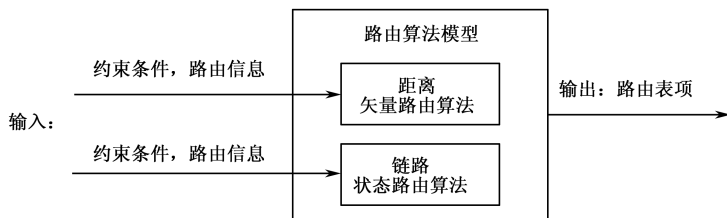


图 4.17 路由算法模型的输入/输出

(2) 流量控制模型的输入/输出

图 4.18 所示为流量控制模型的输入/输出。流量控制模型的输入是流量控制算法模型

的输入条件, C , W 和 ΔT 分别表示: 漏斗的容量、节点产生的最大令牌数、令牌输出时间间隔。这里漏斗的容量取决于节点的存储能力和处理能力。

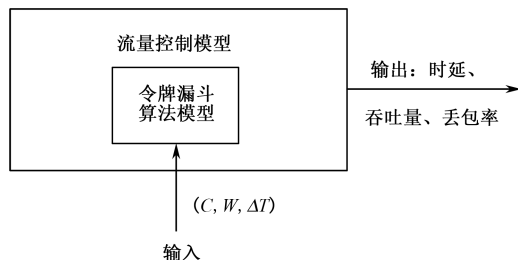


图 4.18 流量控制模型的输入/输出

(3) 网络交换模型的输入/输出

网络交换模型的输入/输出如图 4.19 所示。网络交换模型与业务模型之间交互的数据是业务，而与数据链路模型之间交互的数据不仅包括业务，还有路由信息，这些路由信息将作为路由算法模型的输入。在网络交换模型内部，包括流量控制模型和路由算法模型，以及各自模型的输入条件和约束条件。

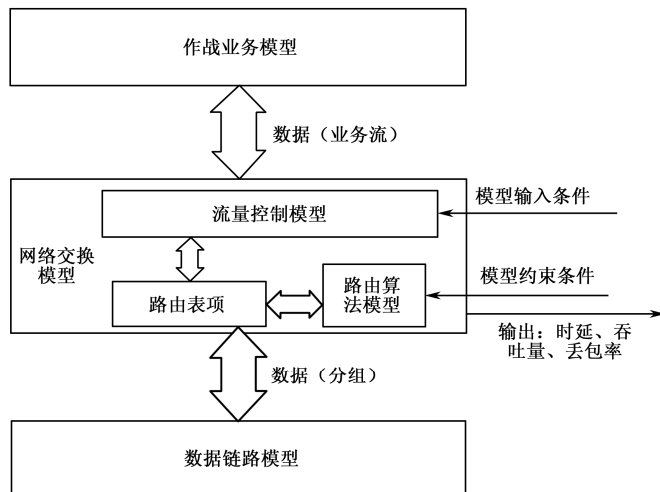


图 4.19 网络层模型的输入/输出

流量控制模型对业务模型下发的业务进行流量整形，然后根据路由算法模型输出的路由表项，将业务下发给数据链路层模型。数据链路模型将收到的数据（业务和路由信息）提交给网络层模型，网络层模型将路由信息交给路由算法模型，将业务交给业务模型。

4.2.4 业务仿真建模

1. 模型描述

战术通信系统中的业务按照载体分为：文字、话音、图像、视频、数据等信息，而按照业务的内容分为：态势感知信息、指挥控制信息、战场环境信息。根据信息的产生特点可以将业务分为周期性业务、突发性业务、话音业务，其中周期性业务和突发性业务主要针对数据业务。周期性业务主要是指一部分态势感知信息，如我军/友军位置信息等，这些信息具有一定的时间敏感性，需要定时传输并且业务的大小变化不大。突发性业务主要是指指挥控制信息和战术环境信息，如简令、预令、火力支援、作战命令文本、告警等，这些业务的产生具有一定的随机性。

业务层模型设计的主要目的是根据战术通信系统中业务的特点，建立业务模型，并使其产生能够满足要求的业务流，然后加载到网络中。反映业务特点的两个重要参数是：业务到达时间间隔和业务的大小。因此，分析周期性业务、突发性业务、话音业务的业务到达时间间隔和大小的规律性，为其选择合适的分布类型，将是业务层模型设计的重点。

2. 周期性业务模型

周期性业务的主要特点是业务按照固定的时间间隔 T 定时产生，而产生的业务大小也变化不大，并且在变化范围内平均分布。因此周期性业务的大小服从均匀分布，其分布函数如式（4-54）所示，它表示周期性业务大小随机变量 X 在区间 $[a, b]$ 中任意等长度的子区间的可能性是相同的，其中 b 和 a 分布表示业务大小的上下限，单位为字节。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-54)$$

3. 突发性业务模型

对于突发性业务的大小，可以分为两种情况考虑：一种是业务的大小以某个点为中心，主要分布在该点的周围，这种可以使用高斯分布模型；另一种是大业务少，小业务多的分布，这种可以使用指数分布模型。这两种类型的分布也是很适合战术通信网中的突发性业务大小的。而对于突发性业务的到达时间间隔可以采用两种建模方法得出：一种是传统的建模方法，使用泊松过程进行分析，但是这种建模方法使业务只具有短相关性；另一种是考虑业务的长相关性或自相似性，使用复合分形点过程模型。

(1) 突发性业务的大小分布模型

① 高斯分布模型

高斯分布的概率密度函数如式(4-55)所示, 其中 μ 表示突发性业务的中心点(均值, 单位为字节), σ 表示业务的大小偏离平均值的程度, X_1 和 X_2 分别表示业务大小的下限和上限。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, & 0 < X_1 \leq x \leq X_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-55)$$

② 指数分布模型

指数分布的概率密度函数如式(4-56)所示, 其中 θ 表示业务大小的变化, X_1 和 X_2 分别表示业务大小的下限和上限。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\theta} e^{-x/\theta}, & 0 < X_1 \leq x \leq X_2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-56)$$

(2) 突发性业务的到达时间间隔分布模型

① 泊松过程模型

战术通信网中突发性业务的产生符合下面的条件:

- 在互不重叠的时间段内, 到达的包为相互独立的随机变量;
- 包到达的过程 $A(t)$ 是一个计数过程, 它表示在 $[0, t]$ 区间内到达的包总数。任给两个时刻 s 和 t , 且 $s < t$, 则 $A(t) - A(s)$ 即为 $[0, t]$ 之间到达的包总数。

任给一个长度为 τ , 到达的包总数服从参数为 $\lambda\tau$ 的泊松分布, 即

$$P(A(t+\tau) - A(t) = n) = e^{-\lambda\tau} \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4-57)$$

式(4-57)中的 λ 表示业务平均到达速率。由泊松过程的定义可知, 满足泊松过程的条件也是上面几个, 因此突发性业务的到达满足泊松过程。并且, 由泊松过程的基本特征可知, 泊松过程的点之间的间隔服从指数分布, 由此可以得出, 突发性业务的到达时间间隔满足指数分布, 其概率密度函数为:

$$P(\tau) = \tau e^{-\lambda\tau} \quad (4-58)$$

② 复合分形点过程模型

据研究人员对网络传输进行的大量测量和分析得出的结论是, 网络中的业务流具有长相关性或相似性。而 Bo Ryu 提出采用复合分形点过程来研究自相似过程的模型, 它可以简单直观地分析网络中出现的自相似现象, 因此可以采用这种模型完成自相似业务的建模。在该数学模型中, 需要描述的参数有三个, 分别为业务平均到达速率 λ , Hurst 参数 H 和分形开始时间 T_0 。改变业务平均到达速率, 就能改变由相似业务流模型产生的网络业务流。Hurst 参数 H 满足 $0.5 < H < 1$, 定义了自相似业务流的相似性, H 越接近于 1

自相似程度越大。分形开始时间 T_0 定义了一个时间尺度, 自相似现象在这个时间尺度上开始出现。

复合分形点过程是由 M 个广义平稳的分形更新过程叠加构成, 每个分形更新点过程叠加构成, 每个分形更新点过程由下述概率密度函数体现其到达时间间隔:

$$p(t) = \begin{cases} rA^{-1}e^{-rt/A} & 0 \leq t \leq A \\ re^{-r} A^r t^{-(r+1)} & t > A \end{cases} \quad (4-59)$$

式中, $1 < r < 2$ 。分形更新点过程叠加模型的三个参数 (r, A, M) 与自相似业务流发生模型中的三个参数 (λ, H, T_0) 的关系如下:

$$H = (3 - r) / 2 \quad (4-60)$$

$$\lambda = Mr[1 + (r - 1)^{-1}e^{-r}]^{-1} / A \quad (4-61)$$

$$T_0^\alpha = 2^{-1}r^{-2}e^{-r}(r - 1)^{-1}(2 - r)(3 - r)[1 + (r - 1)e^r]^2 A^\alpha \quad (4-62)$$

$$\alpha = 2 - r \quad (4-63)$$

在输入 λ 、 H 、 T_0 的情况下, 根据式 (4-60) 至式 (4-63) 可以确定 (r, A, M) 。对于不同的分形更新过程, 给出不同的 λ 、 H 、 T_0 , 而得出不同的 (r, A, M) , 然后由这些过程叠加而得到复合分形点过程。

4. 话音业务模型

战术通信系统中, 话音业务的两个重要特点是: 随机产生呼叫、通话有一定的持续时间。基于话音业务的特点可以采用 ON/OFF 模型来对其进行建模。ON/OFF 模型只有 ON 和 OFF 两个状态, 当处于 ON 状态时产生业务, 进行通话, 而处于 OFF 状态时不产生业务, 处于静默状态。设 ON 状态的持续时间为 τ (秒), OFF 状态持续时间为 θ (秒)。则通话持续时间随机变量 τ 和静默持续时间随机变量 θ 独立同分布, 并服从 Pareto 分布, 其分布函数为:

$$p(\tau) = \alpha^\tau (k_\tau)^{\alpha^\tau} \tau^{-\alpha^\tau-1} \quad (k_\tau > 0, \tau \geq k_\tau, \tau \leq m_\tau) \quad (4-64)$$

$$p(\theta) = \alpha^\theta (k_\theta)^{\alpha^\theta} \theta^{-\alpha^\theta-1} \quad (k_\theta > 0, \theta \geq k_\theta, \theta \leq m_\theta) \quad (4-65)$$

式中, 参数 k_τ 和 k_θ 决定随机变量 τ 和 θ 可以取的最小值, 而参数 α^τ 和 α^θ 决定随机变量 τ 和 θ 的均值和方差。如果 $\alpha^\tau \leq 2$, 则随机变量 τ 的分布具有无穷大的方差; 如果 $\alpha^\tau \leq 1$, 则随机变量 τ 的分布具有无穷大的均值与方差。同理, 当 α^θ 满足前面的条件时, 则随机变量 θ 也具有同样的分布。但是在战术通信系统中, 随机变量 τ 和 θ 不可能取无穷大, 即通话持续时间或静默时间不可能一直持续, 因此必须有个最大的范围, 参数 m_τ 和 m_θ 决定随机变量 τ 和 θ 可以取的最大值。

对于话音业务来说, 在通话期间可以认为数据是以恒定的速率产生的, 因为在通话中是某一方一直在讲话。设恒定数据速率为 V (比特/秒), 则在 ON 状态持续时间产生的话音业务大小 l (比特) 为:

$$l = V \times \tau \quad (4-66)$$

5. 模型的输入/输出

(1) 周期性业务模型的输入/输出

周期性业务模型的输入/输出如图 4.20 所示。输入时需要 3 个参数： T 、 a 、 b ，它们分别表示周期性模型的周期、业务大小的下限、业务大小的上限。对于这 3 个参数，可以根据具体的网元模型而不同，如作战坦克、连长指挥车、营长指挥车等。

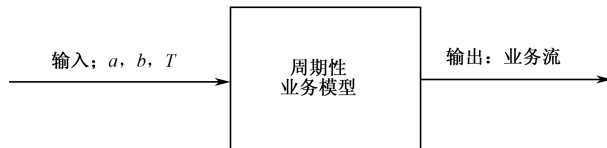


图 4.20 周期性业务模型的输入/输出

(2) 突发性业务模型的输入/输出

突发性业务模型的输入/输出如图 4.21 所示。在输入时，首先选择业务大小模型和业务到达时间间隔模型，然后再设置选择模型的参数，这些参数可以根据建模的对象不同而进行设置，如作战单车、营连指挥车等。由于复合分形点过程是由多个广义平稳的分形更新过程叠加构成的，所以在选择复合分形点过程模型时，要根据选择广义平稳过程个数的不同，分别设置各自的 λ_i 、 H_i 、 T_{0i} 。

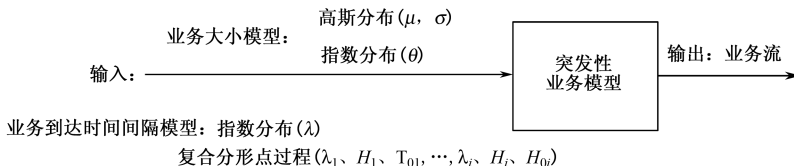


图 4.21 突发性业务模型的输入/输出

(3) 话音业务模型的输入/输出

话音业务模型的输入/输出如图 4.22 所示。在输入时，要根据建模对象的不同来设置 $(\alpha^r, k_r, \alpha^\theta, k_\theta, V)$ ，因为不同的网络单元其相应的话务量是不同的。

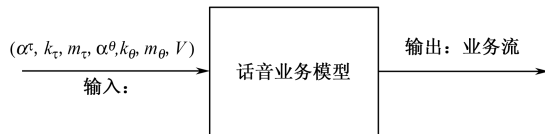


图 4.22 话音业务模型的输入/输出

(4) 业务层模型的输入/输出

业务层模型设计的主要目的是模拟战术通信系统中的业务产生，向下层（网络层）

不断地输出业务流，然后加载到战术通信系统中，另外业务层模型还能够接收其他网络节点提交的业务。由于在战术通信系统中，不同的网元担任着不同的角色，因此它们产生业务的频率和大小也是差别很大的。在为网元配置业务时，首先要根据其担任的角色，选择适当的业务类型模型和分布模型，然后再给分布模型输入合适的参数。业务层模型的输入/输出如图 4.23 所示。

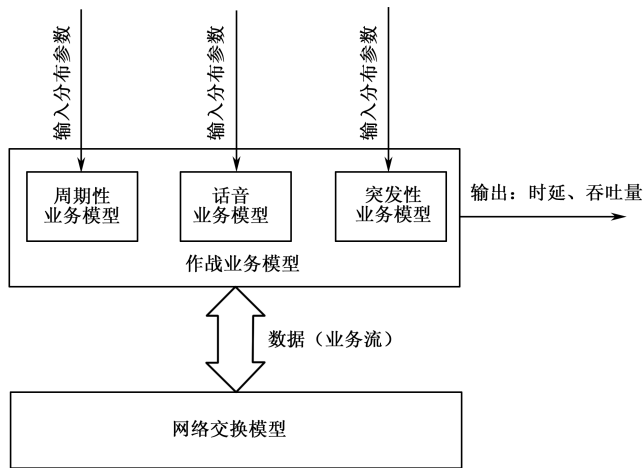


图 4.23 业务层模型的输入/输出

4.3 节点模型

为了满足运动作战的需要，战术通信系统的装备通常都集成装车使用，网络的组织、管理、地址的划分等也是以车为单位来进行。因此，构成战术通信系统网络拓扑的节点通常都使用车的方式。对战术通信系统而言，车内装备的构成与关系、车之间的关系与网络组织关系构成了战术通信系统装备建设的实质内容。对应地，节点的仿真建模主要内容也包括两方面，一是节点模型的内部构成与关系，即如何将层次模型根据装备的需要科学地配置到节点模型之中；另一方面是节点之间的关系模型，这部分与节点所采用的组网协议、拓扑结构有关系，一般也把节点的关系模型称为网络模型。

战术通信系统所使用的组网协议主要隐含在节点的网络层模型与链路层模型中，而战术通信系统的拓扑关系是动态变化的，难以用数学的方法进行描述，需要通过仿真来进行模拟，但节点的装备构成是决定网络拓扑的基础，因此节点的关系模型可以通过节点的装备构成来体现。通过建立灵活可变的节点模型结构，以适用于师、团、营多级规模网络仿真需要，支持分布式半实物仿真中联邦成员的灵活划分和组建。

4.3.1 模型结构

在战术通信系统中主要存在信息交换节点、指挥节点以及战斗节点等 3 种主要的节点结构。这 3 种节点结构是一个基础的结构，通过对它进行裁剪或配置，可以派生出满足不同需要的多种节点类型。

1. 信息交换节点

信息交换节点是战术通信系统的骨干节点，具有强大的路由交换功能，提供较高速的传输能力与中继转发能力，是构建网络的核心，提供干线传输交换能力。节点的模型组成如图 4.24 所示。信息交换节点没有业务模型，但在实际节点建模时，可增加业务层模型，以提高仿真的灵活性。

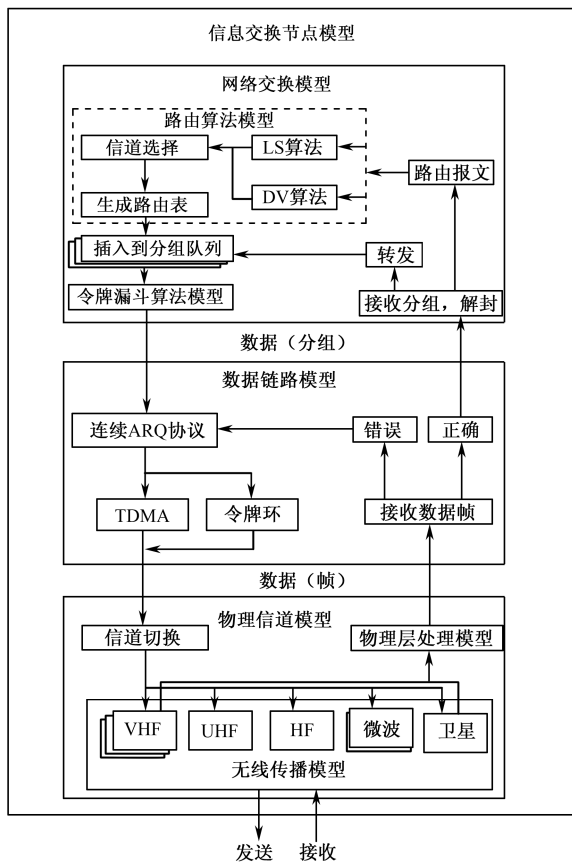


图 4-24 信息交换节点模型结构

在略去一些常规的处理模块后，信息交换节点的模型结构如图 4.24 所示。为了承担

干线信息传输任务,信息交换节点一般具有 VHF、UHF、HF、微波以及卫星等多种传输信道设备,一般微波传输设备至少有 2 个以上,以满足不同方向的中继需要,而 VHF 也可有多个,满足不同组网的需要。传输信道设备可以根据需要进行裁减或配置,从而派生出多种满足不同需要的信息交换节点。但它们基本的原理结构都如图 4.24 所示。

信息交换节点的核心是网络交换模型,它要完成在不同信道之间的路由选择、分组转发寻路的任务,而不同的信道采用的路由协议是不一致的,因此信息交换节点首先要根据信道的情况选择使用的路由协议,并在不同的路由协议之间进行优选,最终选择出分组转发的信道。不同信道的流量控制模型参数,例如漏斗的容量 C 、令牌输出时间间隔 ΔT 都是不同的。根据路由选择方法的不同,可以有诸如 RIP、OSPF 等多种路由协议,但基本上它们都是从距离矢量(DV)或链路状态(LS)算法演化而来的。

在网络交换模型选择出信道并进入对应的流量控制模型队列后,分组会发送到数据链路模型。其中逻辑链路层模型采用连续 ARQ 协议模型,不同信道的连续 ARQ 协议模型的超时定时器 t_{out} 和发送窗口 W_T 设置是不同的,在仿真时根据仿真场景进行具体的设定。在分组经过逻辑链路层后,要等待媒体接入协议的控制,获得发送的令牌或时隙。信息交换节点的媒体接入协议一般有 TDMA 与令牌环协议两种,TDMA 协议主要用于 VHF、UHF 信道,令牌环协议主要用于 HF 信道,而微波、卫星信道则直接进行发送。一般一个时帧中 VHF 有 16 个时隙,而 UHF 有 44 个时隙,由于 UHF 传输速率较高,因此在仿真时称为高速数据电台(WDR)。

在分组经过数据链路模型组成帧后,会发送到对应的信道上进行传输。由于不同的信道无线传输模型是不同的,因此图 4.24 中对它们进行了区分。图中的 VHF、UHF、微波等不仅代表对应的收发信机,也包括对应的无线传播模型所带来的损耗。其中移动模型会影响节点之间的距离,这个距离通过无线传播模型而影响信号的接收功率(或路径损耗),从而影响接收信号的信噪比或误码率。这些参数都需要通过仿真根据具体的使用场景来动态获得。

2. 指挥节点

指挥节点是战术通信系统的接入节点,提供强大的接入能力,用于将本地的各种应用接入到战术互联网中,并提供信息的路由交换功能,同时它也是信息的产生者与使用者。指挥节点具有很强大的业务产生功能。

指挥节点与信息交换节点的结构基本一致,如图 4.25 所示。主要的区别在于:指挥节点是业务的产生者与使用者,因此它有作战业务模型;指挥节点的信道设备主要用于接入信息交换节点,因此信道的设备类型中,微波一般只有 1 个,而没有卫星信道。

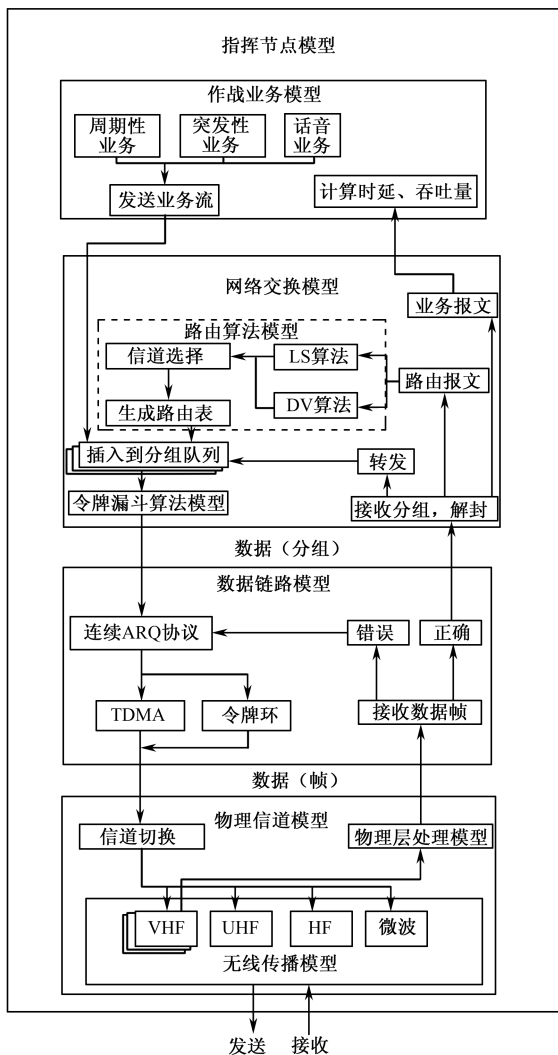


图 4-25 指挥节点模型结构

指挥节点在使用时，首先根据仿真需要选择模拟的业务类型，并设置业务的长度、产生时间间隔等参数，一个节点可配置一个业务，也可以配置多个业务。这些业务在网络交换模型中，与转发业务一起由流量控制模型进行排队处理。

指挥节点的信道设备较少，因此它的路由协议比信息交换节点简单，但基本机制是一样的。其余部分与信息交换节点类似，这里不再赘述。

3. 战斗节点

战斗节点是战术通信系统的末端节点，主要用于本地信息的收发，并提供有限的路由交换能力。战斗节点的业务模型与路由交换模型功能都较弱，甚至没有路由的功能。

具有路由功能的战斗节点模型如图 4.26 所示。

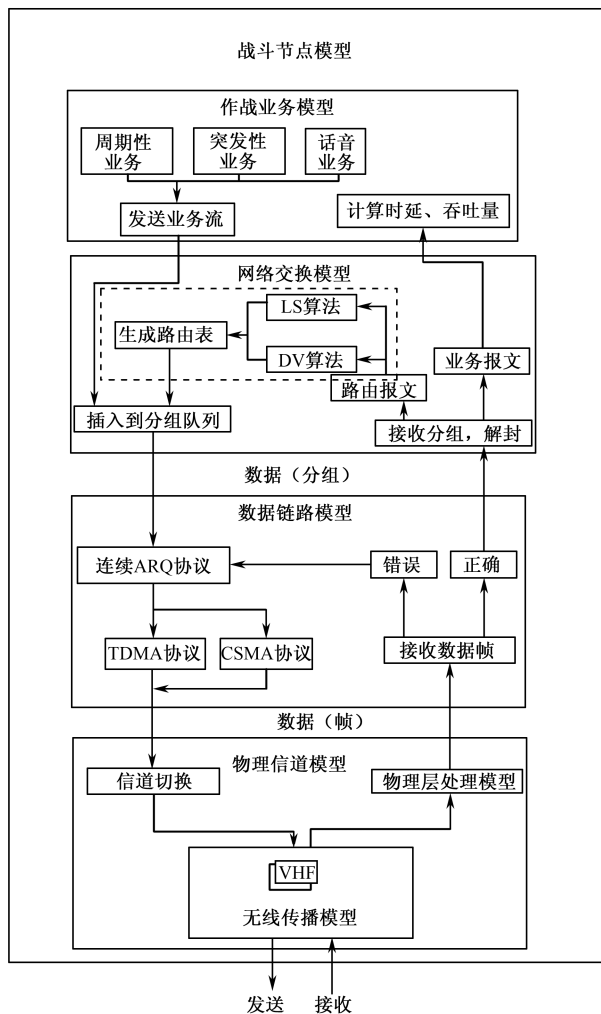


图 4.26 战斗节点模型结构

战斗节点作为网络的末端节点，一般采用适合使用特点的动态路由协议或分组网路由协议，也可静态配置路由。节点一般只发送本节点的业务，没有流量控制能力。由于战斗节点的业务量较少，因此媒体接入协议可采用固定分配的 TDMA 协议，也可采用 CSMA 协议，提高信道利用率。在某些特殊的使用场合，战斗节点还可以加装 HF 信道。

4.3.2 节点关系模型

1. 前提与假设

节点之间通过不同的物理信道互连，包括有线信道和各种无线信道，节点所拥有的信道以及信道的连通性构成了节点的邻居关系或节点的拓扑关系。网络所有节点的拓扑关系的集合则构成了网络拓扑关系。每一种信道都会构成一个网络拓扑关系，不同信道构成的拓扑关系一般是不同的，战术通信系统的节点一般都具有多个信道，因此战术通信系统的网络拓扑结构是一个不同拓扑关系的分层组合，而且这个拓扑会随着使用方式、地形、移动模型等动态变化，其拓扑结构示意图如图 4.27 所示。

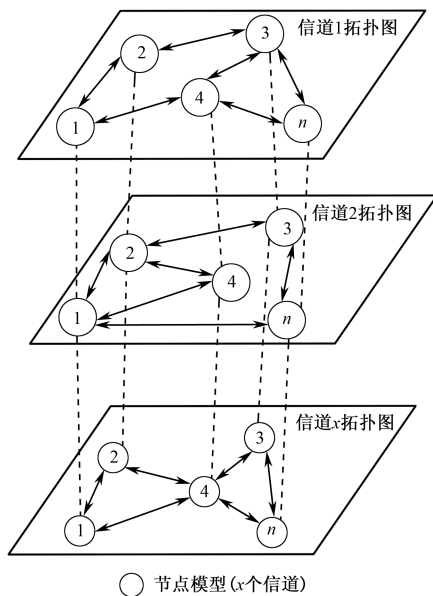


图 4.27 多信道节点拓扑关系示意

节点关系模型是对节点之间的拓扑关系的一种描述，即节点之间所构成的网络形态，也可称为网络模型。通过建立节点关系模型，对战术通信系统的分层网络结构进行分析，在节点内部结构建立后，确定节点组网所必须具有的一些基本特性与约束条件。通过对节点关系模型的分析，可以确定战术通信仿真系统仿真联邦成员的划分依据与划分方法，寻找在将战术互联网划分为几个联邦成员（子网）后成员内部节点的路由关系，为仿真系统联邦成员的建设途径、路由算法的设计以及系统的建设提供分析工具。

节点关系模型主要关心网络的节点与节点之间的链路，为描述的方便，将战术通信系统简化表示为 $G(N, E)$ ，对其复杂的关系则在推导中加以描述^[21]。

战术通信系统 $G(N, E)$ ， N 为节点集，表示由各层协议有机组合所构成的车， E 为通

信链路集。对战术通信系统的网络拓扑而言, 通信链路的状态可以认为只有通一断两种状态, 而且战术通信系统的任意节点之间是否具有直接连通的通信链路是彼此无关的, 因此 $G(N, E)$ 可看为一个单触点开关 (SC) 网络。

2. 节点关系模型的描述

对任意一对节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ ($N_i, N_j \in N, i \neq j$) 之间的直接通信链路是一个动态变化的量, 记为 $c_{ij}(t)$, $c_{ij}(t) \in E$ 。其中, t 是表征与 $\langle N_i, N_j \rangle$ 连通性有关的变量的集合。对战术通信系统 $G(N, E)$ 而言, 在某个确定的 t 状态, 节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间的通信信道可能有多条, 例如两个节点之间可能同时具有 VHF、UHF 或者微波通信信道, 也可以只有其中的一种。假如节点之间有几个信道直接相连, 则只要有一条信道是连通的, 两个节点之间就认为是通状态。

在战术通信系统中, 使用的信道可大致划分为以下几种: HF、VHF、UHF、微波、有线等几种, 它们也是实际战术通信系统中所使用的电台或联络的方式。因此设:

$$X = \begin{cases} x_h, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 具有直接 HF 链路} \\ x_v, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 具有直接 VHF 链路} \\ x_u, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 具有直接 UHF 链路} \\ x_m, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 具有直接微波链路} \\ x_l, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 具有有线直接链路} \\ \dots \\ x_o = 0, \langle N_i, N_j \rangle (i \neq j) \text{ 没有直接链路} \end{cases} \quad (4-67)$$

X 表示 $G(N, E)$ 所有可用的通信信道的集合, 也就是战术通信系统车节点所装备的电台的集合。

根据战术通信系统的特殊性, 节点之间能否通过某个信道 x_k ($x_k \in X$) 直接相连与以下因素有关: 是否具有该信道 Ra_k , 该信道内的组网规则 Nr、信道特性 ch (包括跳频特性、发射功率、接收灵敏度、距离、地形环境、纠错性能等) 有关。因此, $c_{ij}(t)$ 可表示如下:

$$\begin{aligned} c_{ij}(t) &= \Phi_{ij}(Ra, Nr, ch) \\ &= \sum_k x_k \times Ra_k \times \varpi_k(Nr, ch) \end{aligned} \quad (4-68)$$

其中: $x_k \in X$, $Ra_k = 1$ 表示 $\langle N_i, N_j \rangle$ 具有信道 x_k , 否则 $Ra_k = 0$ 。

$\varpi_k(Nr, ch) = \varphi_{ij}(Nr) \times \phi_{ij}(ch)$ 表示信道的通断状态, 是一个布尔变量, 它们的计算如下。

在战术通信系统中, 通过 IP 地址、路由域等来区分不同的子网, 不同的子网之间只

能通过两个子网的网关节点来实现子网之间的互连互通, 组网规则 Nr 用来区分信道 x_k 内不同子网的规则集, NR 表示属于同一 Nr 下的所有节点。则:

$$\varphi_{ij}(Nr) = \begin{cases} 1, & N_i, N_j \in NR \\ 0, & N_i, N_j \notin NR \end{cases} \quad (4-69)$$

同时, 节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 是否能通过 x_k 进行通信, 还与两个节点使用该信道的当前跳频频率 h_i, h_j 、信道状态 er 有关。其中, 信道状态 er 与节点间的相对距离、运动速度、发射功率、接收灵敏度、地形环境、纠错性能以及干扰等有关, 它们对信道的影响都可以归结为对信道误码率 er 的影响, 它们对该信道的影响可通过相应的模型或仿真等手段来获得。信道状态一般通过一个门限 th 来进行区分, 当 $er < th$ 时, 可判断信道处于通的状态。因此:

$$\phi_{ij}(ch) = \begin{cases} 1, & \text{当}(h_i = h_j) \text{且}(er < th) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4-70)$$

通过 $\phi_{ij}(ch)$ 将物理特性对信道的综合影响简化为通—断两个状态, 将战术通信系统的多层拓扑结构简化为节点的状态描述, 从而为利用多层拓扑结构的优势提供了基础。

此外, 有线信道与无线信道的传输特性有差别, 在战术通信环境中, 可认为只要两端能通过有线直接连接, 就可以认为有线是连通的, 而不用考虑距离等的影响, 即:

$$c_{ij}(t) = \Phi'_{ij}(Ra_l) = x_l Ra_l \quad (4-71)$$

将式 (4-69)、式 (4-70)、式 (4-71) 代入式 (4-68), 可到某一状态 t 下, $\langle N_i, N_j \rangle$ ($N_i, N_j \in N$) 之间的通信链路 $c_{ij}(t)$:

$$c_{ij}(t) = \Phi_{ij}(Ra, Nr, ch) = \begin{cases} \sum_k x_k, & i \neq j, x_k \in X \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (4-72)$$

其中 k 代表 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间可用的通信信道的数量, 它与战术通信系统的节点配置有关。如果 $c_{ij}(t) = 0$, 则表明 $\langle N_i, N_j \rangle$ 两个节点不直接相邻, 它们之间没有任何信道相连, 在网络拓扑图上没有边直接连接这两个节点。

据此, 可作出战术通信系统 $G(N, E)$ 的连接矩阵 $C(t)$:

$$C(t) = [c_{ij}(t)]_{n \times n} = [\Phi_{ij}(Ra, Nr, ch)]_{n \times n} \quad (4-73)$$

其中 $n = |N|$ 代表 $G(N, E)$ 网络节点的个数, 如果所有的信道均为双向信道, 则 $C(t) = C(t)^T$ 。

据此, 可以表示出 $G(N, E)$ 不同时刻的拓扑状况以及任意节点对之间的通信路径等状况。在代入 $c_{ij}(t)$ 的表达式, 则可以描绘出节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 在的 t 时刻使用的信道的状况。

定义 4.4 $\langle N_i, N_j \rangle$ 节点对间的路径函数 $F_{ij}(t)$: 是节点 N_i 与 N_j 之间所有路径的边变量的乘积的和。

例如, 节点 N_1 与 N_4 之间有 2 条路径, 分别为经过 N_2 和 N_3 , 则:

$$F_{ij}(t) = P_1 + P_2 = c_{12}c_{24} + c_{13}c_{32}c_{24}$$

路径函数 $F_{ij}(t)$ 可以用来表示战术通信系统中任意节点对 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间在 t 时间可用的路径数目, 该数目包含那些迂回路径, 通过比较不同的路径的代价, 可以作为路由选择的基础。

下面来推导 $F_{ij}(t)$ 与战术通信系统 $G(N, E)$ 的连接矩阵 $C(t)$ 之间的关系。

设 $C_{ij}(t)$ 是划去连接矩阵 $C(t)$ 中第 i 行和第 j 列的子矩阵, 对于双向信道, 则 $C_{ij}(t) = C_{ji}(t)$ 。

令 $PC_{ij} = |C_{ij}(t)|^+$, 表示将 $C_{ij}(t)$ 的行列式展开后并去掉冗余项的和, 其中行列式展开的每一项都取正值。去掉冗余项是对和项进行布尔运算, 对应于网络来说就是去掉环路的过程。例如 A 与 AB 是一个和函数的两项, 则 AB 叫 A 的冗余项。

定理 4.1 连接矩阵 $C(t)$ 的任意一个 PC_{ij} ($i \neq j$) 是以节点 N_i 和 N_j 为两端的路径函数 $F_{ij}(t)$, 即: $F_{ij}(t) = PC_{ij}$ 。

该定理通过二端开关网络的性质可以直接得到。

因此, $F_{ij}(t) = PC_{ij} = |C_{ij}(t)|^+$

$$= |[c_{kl}(t)]_{(n-1) \times (n-1)}|^+ = |[\Phi_{ij}(\text{Ra}, \text{Nr}, \text{ch})]_{(n-1) \times (n-1)}|^+$$

其中 $k \neq i, l \neq j$ 。

则:

$$F_{ij}(t) = \sum_{m=1}^p e_1^m(t) e_2^m(t) \cdots e_K^m(t) \quad (4-74)$$

其中, p 为 $|C_{ij}(t)|^+$ 展开后并去掉冗余项后的项数, 代表 $\langle N_i, N_j \rangle$ 间具有 p 条路径, $e_k^m(t)$ 是第 m 条路径上的边, K 是该条路径的边数。

针对战术通信系统而言, 节点的度总是有限的, 远小于节点的总数, 因此上式的结果总是只有几项。

节点关系模型是对节点之间拓扑关系的一种数学描述, 是通过数学方式对节点进行计算的基础。节点关系模型定义了仿真系统中节点可能建立的拓扑关系的最大值, 可用于分析网络的极限性能。在实际应用中, 可通过节点关系模型来对网络进行分析、规划、配置, 也可作为仿真系统中某个仿真成员内网络的描述方式。

3. 通过模型计算路由

结合战术通信系统的实际, 路径函数 $F_{ij}(t)$ 的物理意义是, 它表示了两个节点之间可以通信的路径数, 路径的数目就是 $F_{ij}(t)$ 的和项的数目, 每个和项的乘积项代表该路径所经过的链路, 其个数代表了该条路径的跳数, 每个乘积项的个体代表了节点之间的可用的通信链路。而在实际的通信中, 路由算法的意义就在于通过某种规则, 从 $F_{ij}(t)$ 的和项

中选出该规则下具有最小代价的项，即为最优路由，通过对选出的最优路由的计算，可定量计算出节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间在某时刻的通信容量；在加载业务量的情况下，就可以计算出业务的端到端时延、吞吐量等；如果再加入对信道时变特性的精确刻画或仿真结果，则可计算出信道的误码率以及丢包率等指标。

通过该式，可以将节点之间的组网规则、相对距离、相对运动模式、通信频率、信道特性等模型与节点之间的可用通信路径关联了起来，通过路由算法可以将可用通信路径与业务的通信路由联系起来，通过对业务的建模，从而可以据此来建立战术通信系统的网络模型。

由式(4-74)，令：

$$F_{ij}(t) = \sum_{m=1}^p L_m \quad (4-75)$$

则 L_m 代表了节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间的所有 p 条路径中的一条，因此：

$$L_m = e_1^m(t)e_2^m(t), \dots, e_K^m(t) = \prod_K e_k^m(t) \quad (4-76)$$

设路由算法进行选择的规则 R_{rule} 为：

$$R_{\text{rule}} : R = L = \Omega_s \{ L_m | m = 1 \dots p \} \quad (4-77)$$

式(4-77)表明， R_{rule} 总是试图从节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 之间所有可能的 p 条路径中，选择一条在约束条件 s 下满足代价函数 Ω 的一条路径 L ，作为两点之间的最优路径。

约束条件 s 是在战术通信系统环境下根据战术需要以及对路径的效能进行衡量的一套规则的集合，通过改变 s 中的规则可以使网络的路由选择能更好适应战术通信环境的需要。

例如，假如需要尽可能的选择直连或跳数最小的路径，则：

$$R_{\text{rule}} : R = L = \Omega_s \{ L_m | m = 1, \dots, p \} = \min \{ \text{hop}(L_m) | m = 1, \dots, p \}$$

其中 $\text{hop}(L_m)$ 是路径 L_m 的跳数，也就是 L_m 中乘积项的个数。

如果要选择两点之间的链路最宽的路径，则：

$$R_{\text{rule}} : R = L = \Omega_s \{ L_m | m = 1, \dots, p \} = \max \{ \min(e_i | e_i \in L_m) | m = 1, \dots, p \}$$

其中 e_i 代表路径 L_m 上的一条边，即一条点到点信道。

因此，通过所建立的战术通信系统 $G(N, E)$ 的连接矩阵 $C(t)$ ，可以建立网络的拓扑连接状况，从而获得任意两个节点之间的连通路径的信息；通过路由算法以及约束条件，可以获得节点之间的路由信息与该路由上的拓扑与信道信息，从而可建立网络业务源一目之间的传输路径模型，计算出网络对该业务的服务性能指标。

设在源节点 N_i 上有一个业务源 $S(t)$ ， t 是业务产生的时间，目的节点是 N_j ，所收到的业务是 $D(t')$ 。根据前面的分析，在节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 的路径函数为： $F_{ij}(t) = \sum_{m=1}^p L_m$ ，即

在 $\langle N_i, N_j \rangle$ 间存在 p 条不同的路径, 对某一条路径 L_m , 它是节点 $\langle N_i, N_j \rangle$ 间的第 m 条路径的每条边的乘积, 由式 (4-76) 可得: $L_m = \prod_K e_k^m(t)$ 。

根据式 (4-67), 假如边 $e_k^m(t)$ 有几条信道, 例如同时具有 VHF 与 UHF 信道, 则 $e_k^m(t) = x_{kv}^m + x_{ku}^m$, 代入式 (4-76), 并展开, 这样根据 L_m 的边使用的信道情况, 可以将 L_m 再细分为多条使用不同信道组合的路径, 此时的路径已经具体到每个节点对之间的信道上, 从而将战术通信系统的多层拓扑简化为多条链路的组合, 充分利用多层拓扑的优势。

需要说明的是, 是否需要细化到信道上再进行路由选择, 与战术通信系统的网络组织运用规则有关, 也与路由算法的性能有关, 细化到信道可以使选择出来的路由达到全局优化, 但会降低路由的灵活性, 增大路由协议的开销与复杂度。下面的推导以具体到信道为基础来进行。

设经过路由算法以及选路的约束条件选择出来的最终路由 R_{rule}^{ij} 为:

$$\begin{aligned} R_{\text{rule}}^{ij} &= \Omega_s \{ L_m | m=1, \dots, p \} = L_r' = \prod_K e_k^{r'}(t) \\ &= x_1^r(t), \dots, x_K^r(t) \end{aligned} \quad (4-78)$$

式中, K 是所选路径的总边数, $x_k^r \in X, k=1, \dots, K$ 。

根据 R_{rule}^{ij} , 可计算出 $\langle N_i, N_j \rangle$ 的性能指标, 以及 $D(t')$ 相对 $S(t)$ 的关系, 具体的计算方式可参考 4.1 节的介绍。

4. 对模型的扩展

一般战术通信系统都是分层结构的, 因此采用上述模型会带来很大的冗余, 针对网络拓扑结构分层的情况, 修改模型如下。

设图 $G(N, E)$ 有 k 个的割点 (若某两个割点之间的边也是割边, 则这两个割点只选择一个作为割点), 则通过这些割点可将图 $G(N, E)$ 分为 k 个子图 $G_l(N_l, E_l)$, 其中 $N_l \in N, E_l \in E, l=1, \dots, k+1$ 且 $N_l \cap N_{l+1} = V_l$, $V_l \in N$ 是子图 $G_l(N_l, E_l)$ 与 $G_{l+1}(N_{l+1}, E_{l+1})$ 的连接点, 也是图 $G(N, E)$ 的割点。

设图 $G(N, E)$ 通过割点 v_k 可划分为子图 $G_1(N_1, E_1)$ 和 $G_2(N_2, E_2)$, 则对任意节点 $v_i \in N_1, v_j \in N_2$, 其中 $i, j \in n$, 则节点 v_i 与 v_j 之间的所有路径都要经过 v_k , 则有:

$$F_{ij}(t) = F_{ik}^1(t) F_{kj}^2(t) \quad (4-79)$$

其中 $F_{ij}(t)$ 、 $F_{ik}^1(t)$ 、 $F_{kj}^2(t)$ 分别对应于图 $G(N, E)$ 、 $G_1(N_1, E_1)$ 、 $G_2(N_2, E_2)$ 的路径函数。

式 (4-79) 表明, 在一个大图拆分为两个子图后, 其路径函数等于它所拆分的两个子图路径函数的乘积, 也就是说, 图的拆分不会影响节点之间的路径数。同时如果这两个子图还存在割点, 还可以按照该方法继续进行拆分。这样可以大大减少分析的复杂

度,非常适合于分析战术通信系统这种由不同的子网构成的分层网络。

通过割点的选取,可以将一个大的图割分为几个较为简单的子图。战术通信系统一般是分层结构,网络上层与下层之间通过两个子网的网关节点相连,网关节点之间通过有线或直接通过内部的路由交换通路实现两个子网的互连互通。因此该网关节点就可以作为网络的割点。

通过割点,可以将整个网络的拓扑分成几个子网来进行研究,可以将子网作为节点来进行研究。对于那些与研究的对象无关的子网,则可通过缩图法,将这些子网略去,这些子网的影响可通过割点来进行代替,从而大大减少复杂度。而且不同子网的路由可以单独选择,也就是说不同的子网可以使用不同的路由协议,这也适合战术通信系统的特殊需求。

它还有一个重要的意义,在实际的仿真系统建模过程中,对于那些只产生影响而不进入内部进行深度研究的要素,可以通过直接在接入点模拟它的影响来获得,为战术通信系统仿真的设计带来实际的效益与理论的依据。

例如,假如某个战术通信系统(如图 4.28 (a) 所示),子网 G_2 通过网关节点 $a1'$ 与 G_1 的网关节点 $a1$ 相连,由于 $a1'$ 与 $a1$ 之间一般是通过有线或内部交换结构相连,甚至可以是一个子网,相对来说,这条通路对网络的整体影响很小,可以忽略以简化网络的分析,因此可以简化为右图的网络结构,后面的研究都是以这个为基础来进行研究,去掉那些无关重要的线路。

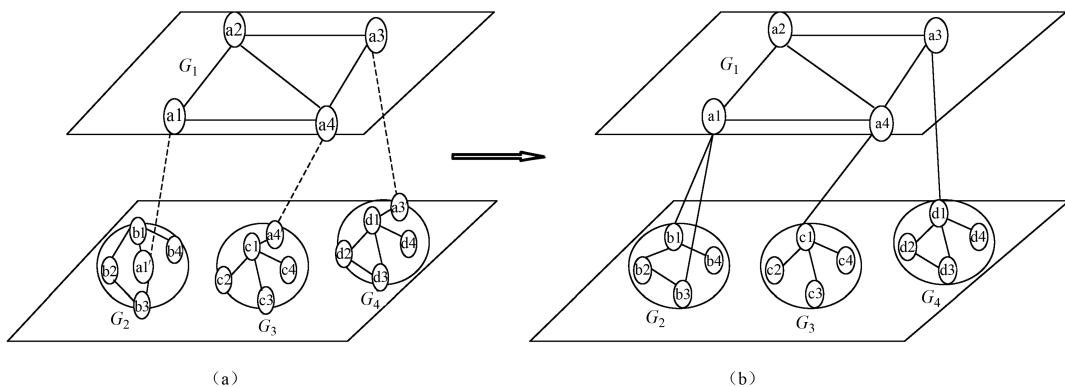


图 4.28 网络的分割与等效

设图 G 代表战术通信系统,则通过 $a1、a3$ (或 $c1$)、 $a4$ ($d1$) 3 个割点可将它分成子图 $G_1、G_2、G_3、G_4$,其中图 G_1 是由 $\{a1, a2, a3, a4\}$ 构成的子网, G_2 由 $\{a1, b1, b2, b3, b4\}$ 构成, G_3 由 $\{a4, c1, c2, c3, c4\}$ 构成, G_4 由 $\{a3, d1, d2, d3, d4\}$ 构成。针对这种情况,假如只需要研究子网内的网络,则可以不用考虑其他的子网,例如要研究 G_1 内网络情况,则可以略去 $G_2、G_3、G_4$,只需在 $a1、a3、a4$ 加入对应的子网对 G_1 的影响即可;假如需要研究两个网络的情况,例如研究两个网络之间节点的端到端路由

情况,则只需研究与这两个子网有关的子网即可,例如要研究 b2 到 a2 的端到端业务的性能,则只需要研究 G_1 、 G_2 两个子网;假如要研究 b4 到 d4 的端到端业务性能,则需研究 G_1 、 G_2 、 G_4 三个子网。

通过这种割图方法,可以很好地适应战术通信系统的网络模型,减少复杂度,提高效率。它不仅可以用来分析整个网络的拓扑,而且可以用来分析由 HF、VHF、UHF 等所构成的不同信道的子网的性能,还可用来分析同一信道划分为多个子网情况下的网络性能。

模型的分割也给战术通信仿真系统的仿真联邦成员的划分提供了理论基础,经过上面的分析,网络的分割也不会对路由带来任何影响,因此也不会对系统性能带来影响,这给战术通信系统采用分布式半实物仿真提供了理论支持。通过本节的这些分析,可以在仿真规划时就确定某个割点所关联的联邦成员,因此可以在割点设置静态路由,降低不同联邦成员之间进行路由交互的信息量,降低系统设计的复杂度。

5. 对战术广播的支持

在战术通信系统中,经常使用广播作为信息传播的途径,因此有必要对战术通信系统中的广播机制进行研究。广播一般采用不可靠的传输方式,对丢失率要求不高,但对时延的要求比较高。

一般把广播分为子网广播与定向广播两种,其中子网广播指由一个子网内的节点发起向子网的其他用户的广播,这种广播主要用于战术通信系统中上下级之间的信息传输;定向广播指由某个节点向与它不直接相连的子网的节点所进行的广播,主要用于越级的紧急指控或态势信息等的传输。

设战术通信系统 $G(N, E)$ 通过割点 v_k ($k=1, \dots, m$, $v_k \in N$) 可划分为子图集合 $\{G_k(N_k, E_k) | k=1, \dots, K\}$, 每个子图代表一个子网。

(1) 子网广播

子网广播一般都可以是一跳可达的,但由于战术通信系统的子网内存在多跳转发的情况,此时就有一些与广播源节点不直接相连的节点不能收到该广播信息,如果对所有广播信息都进行转发,则会发生广播风暴,因此必须对广播机制进行修改,使那些不能直接收到广播信息的节点可以收到广播报文,以适应战术通信系统的需要。此时实际上广播变成了组播,只不过源节点是采用广播地址进行发送,也不需要建立组播树和组播路由协议。

对于子网广播,即对任意广播源节点 $S^k = v_j^k \in N_k$, 目的节点则为 $v_i^k \in N_k$, $v_i^k \neq S^k$, 则对子网 $G_k(N_k, E_k)$ 的连接矩阵 $C_k(t)$, e_l^k ($l=1, \dots, (|N_k|-1)$) 代表 $C_k(t)$ 中源节点 S^k 与子网中其他节点连接的边的值,即 $\forall e_l^k \in \{c_k^j(t)\}$, $\overline{c_k^j(t)}$ 表示 $C_k(t)$ 中 S^k 所对应的行向量(或列向量,对双向信道而言)。如果 $\forall e_l^k = 0$, 则表明源节点与本子网的某

些节点不直接相连,此时必须构建广播树来转发广播信息。

设 $\overline{N_k}$ 表示 $\overline{c_k^j(t)}$ 中 $e_i^k \neq 0$ 的节点集合, $\overline{N_k} \subseteq N_k$, 则对任意节点 $v \in \{N_k - \overline{N_k}\}$, 采用最小树生成算法, 根据式 (4-78) 所确定的路由算法约束条件, 寻找源节点 S^k 到所有 v 之间的最优路由, 并找到到达所有节点 v 的所有广播信息转发节点集合 N'_k , 从而构成以 S^k 为根节点的广播树。寻找节点 S^k 到 N_k 中所有节点的广播树算法与该子网所采用的路由算法有关, 详见前面的描述, 这里不再赘述。

根据所找到的 S^k 的子网广播树以及转发节点集合 N'_k , 则可实现子网广播信息的转发, 此时对转发节点集合 N'_k 必须进行设置, 即对任意节点 $v_j \in N'_k$, 在收到节点 S^k 发出的广播报文时, 同时将该广播报文的地址修改为通过 v_j 所转发的目的节点 v 的地址, 以单播报文的形式发送出去。这样既可保证每个节点都收到广播报文, 也不会产生广播风暴。在实际应用过程中, 可以根据战术应用的不同, 通过网络管理软件来进行设置。

当找到 S^k 的子网广播树后, 可根据该树对广播的性能进行计算, 其计算方法如第 4 章所示。不过, 所计算出来的性能指标是多个, 应根据情况进行选择。

(2) 定向广播

定向广播主要用于网络可划分为多个子网时, 某个节点向另外一个子网的所有节点发送信息的一种传输方式。这种方式只是前面子网广播的一个延伸。

将网络 $G(N, E)$ 的子图集合 $\{G_k(N_k, E_k) \mid k=1, \dots, K\}$ 视为图的节点, 将割点 v_k ($k=1, \dots, m, v_k \in N$) 视为连接不同子网的边, 则可作出子网连接割点矩阵 $C^{\text{sub}}(t)$:

$$C^{\text{sub}}(t) = [c_{ij}^{\text{sub}}(t)]_{K \times K},$$

其中, $c_{ij}^{\text{sub}}(t) = N_i \cap N_j$ ($i, j=1, \dots, K$) 表示子网 $G_i(N_i, E_i)$ 与 $G_j(N_j, E_j)$ 之间的割点, $c_{ij}^{\text{sub}}(t) \in \{0, v_k \mid (k=1, \dots, m, v_k \in N)\}$ 。

设广播的源节点 $S' \in N_i$ 是 $G_i(N_i, E_i)$ 内的节点, 目的子网为 $G_j(N_j, E_j)$, 则通过子网连接割点矩阵 $C^{\text{sub}}(t)$, 根据式 (4-74) 可以找出从源节点到目的子网之间所有路径的子网与割点。根据式 (4-78) 可寻找出最优的广播路径。

设该路径上割点 a, b , 其中 $a \in N_i, b \in N_j, (a, b) \in v_k$ ($k=1, \dots, m, v_k \in N$), 割点 a, b 之间广播路径的计算与单播路由的相同, 可通过式 (4-78) 计算得出, 设为 P_m 。

S' 与割点 a 都属于 $G_i(N_i, E_i)$, 通过 $G_i(N_i, E_i)$ 的连接矩阵可以计算出它们之间的广播路径 P_{sa} 。而目的子网 $G_j(N_j, E_j)$ 是一个以割点 b 为根的广播树, 其计算方法见前面子网广播所示 (此时 $S^k = b$), 设为 P_{tb} 。则定向广播的路径 P 为:

$$P = P_{s'a} \times P_m \times P_{Tb}$$

这样就确定了定向广播的广播路径, 根据该路径可以计算出定向广播的性能。

当把广播的目的用户设为子网的一部分节点时, 则广播算法就变为组播算法, 其计算方法通过前面的子网广播方法与定向广播方法就很容易推导获得。

广播模型的主要用途是在分布式仿真成员划分时, 用于确定联邦成员之间的广播路由, 用于对节点的广播协议进行约束。

4.4 模型应用

战术通信仿真系统的设计采用自顶向下的设计方法, 注重于整体性能与网络全局相关的主要因素, 注重于建立作战视图与系统视图之间的联系。仿真系统建设最主要的工作在于提供一个通用的、灵活的、开放的以及可重用的仿真平台框架, 通过对现有模型、新开发模型的综合利用, 满足网络应用、验证以及试验的需要。

通过 4.1 节的分析, 战术通信仿真模型结构包含了战术通信的各层模型, 是一个模型库, 各层模型之间采用统一的标准接口来实现, 可根据战术通信发展的需要不断的添加新的仿真模型。在该模型库之上, 通过对作战应用模式的研究, 对模型库里的模型进行组织、配置, 然后构成与仿真对象对应的仿真系统, 并在此基础之上进行性能验证、应用开发等。这样不仅可以降低开发的工作量, 而且可以促进资源的共享与重用, 并适应未来的发展。

因此, 战术通信仿真系统的设计思路是在已有的模型库之上, 从顶层设计的角度开发一个开放并通用的框架, 通过对各种模型的合理配置与组织, 完成对系统整体性能的试验。在进行仿真试验时, 其流程如图 4.29 所示。

(1) 首先分析战术应用, 对战术通信的试验输入、制约关系以及组织运用方式等进行深入的研究, 明确网络内部要素以及它们之间的关联关系与运用关系。

(2) 确定仿真的目标, 确定仿真脚本, 确定参与仿真的要素与设置, 明确仿真中的事件设置及其流程。

(3) 根据仿真目标, 确定仿真中战术通信的网络设置, 确定网络中各要素的角色及其信息交互关系, 确定仿真系统中各分布式成员所承担的任务与配置。

(4) 根据角色设置, 确定使用的模型, 确定模型的输入输出参数, 并进行配置, 对模型进行组织, 以完成本次仿真任务。

(5) 建立目标仿真系统。目标仿真系统的设计基础来源于各层协议模型和仿真任务的需要, 然后在此基础上构建相应的分布式网络仿真运行实例, 确定模型和数据的存储方式, 以及模型之间的输入输出关系。

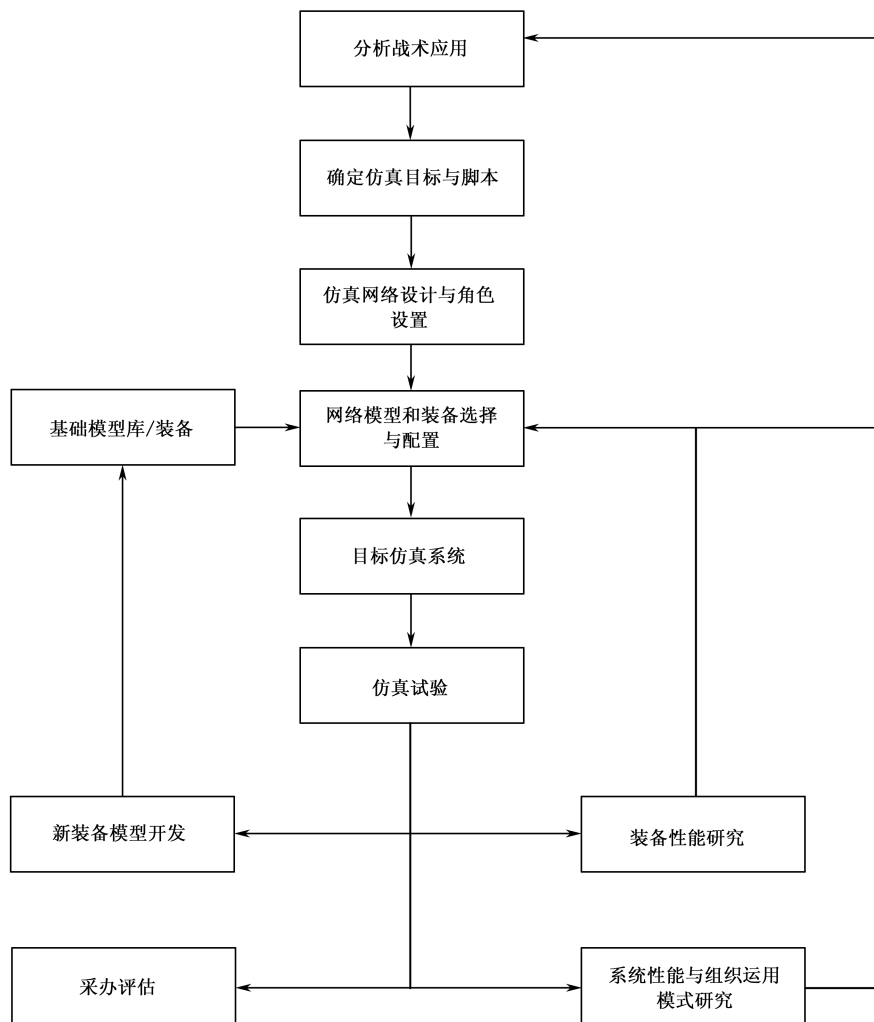


图 4.29 战术通信仿真系统试验流程

(6) 仿真试验。根据仿真脚本，产生仿真事件，对仿真试验过程进行控制，完成预定的仿真任务。通常仿真试验涉及初始化、仿真运行时间、每次运行的重复次数等。

(7) 结果处理，根据仿真试验的结果进行处理。如果是对战术通信性能进行研究，例如系统联试等，则可能要进行不同配置的多次试验；如果是新模型的开发，则需对模型进行验证与试验，通过后将它加入到模型库中；如果是系统性能验证或组织运用模式研究，则可能需要进行多次重复试验，可能在要不同的作战应用背景下进行试验。

在进行仿真应用时，系统的端到端吞吐量、时延、丢失率等指标通过仿真系统来统计获得。具体的方法是：首先构建仿真场景，确定各联邦成员承担的仿真任务与角色，确定每个成员里节点的业务以及业务流向，然后在管理控制联邦成员的控制下，各联邦成员协调一致的推进仿真时间与事件。由于战术通信分布式仿真系统的仿真时间是一致的，因此，在业务发送的源端，通过在每个数据分组里携带分组发送的时戳信息与序号信息，目的端可以根据接收到该分组的时间计算出分组的端到端时延，根据序号计算出丢失率，通过增加业务量的大小，统计目的端收到的数据量来计算吞吐量。

第5章 战术通信仿真可信性保证技术

仿真技术发展至今,已经在军事、社会、经济领域有了广泛的应用,尤其是对大型系统的研制有很大的辅助作用。在战术通信系统中运用仿真技术,具有安全、经济、不受气象环境和场地限制的特点,并且可以反复试验,快速获取不同约束条件下的试验数据,并可根据仿真结果对系统进行分析、评估、完善等,然而仿真结果的正确性决定了对系统分析、决策的有效性。如何确定仿真结果的可信性,需要引入新的技术对其进行保证。VV&A (Verification Validation and Accreditation) 技术已经在仿真领域里有了比较成熟的应用,在战术通信仿真系统里也必须运用 VV&A 技术,贯穿仿真系统的设计、开发、测试、应用和维护,才能够有效保证仿真结果的可靠性。本章介绍实现仿真可信性的基本技术和方法。

5.1 基本概念

5.1.1 VV&A 的概念

VV&A 的定义分为校核 (Verification)、验证 (Validation) 和确认 (Accreditation) 三部分。

(1) 校核 (Verification)

确定 M&S (model and simulation) 是否准确反映开发者的概念描述和技术规范的过程。在战术通信仿真系统中运用了分布式半实物的仿真方法,校核不仅是确定协议模型、节点模型、网络模型建模的准确性,而且要确定联邦建立的正确性,能够真实反映系统的组织运用模式。

(2) 验证 (Validation)

从预期应用角度确定 M&S 再现真实世界的准确程度的过程。再精确的仿真建模也会与真实情况有所差别,验证并不是要求仿真结果与真实情况完全一致,必须与仿真的目的相结合,允许一定程度的差别。在战术通信仿真中,应根据其军事应用的特点,确定仿真的关键点,严格把握关键点的精确度,通过与真实世界测试结果相比对,验证仿真建模的准确性。

(3) 确认 (Accreditation)

权威机构认证 M&S 相对于预期应用来说是否可接受的过程。

5.1.2 仿真逼真度

逼真度是模型或仿真以可测量或可觉察方式复现真实世界对象的状态和行为的程度,有模型逼真度和仿真逼真度之分。仿真逼真度是仿真对仿真对象某个侧面或整体的外部状态和行为的复现程度,解决的是“像不像”的问题;模型逼真度是在研究目的的限定条件下,模型相对于仿真对象的近似程度,模型验证可得到数学模型的逼真度,而模型校核可解决仿真模型逼真度问题。

逼真度通常和一些术语联系在一起,并使用它们进行描述,下面给出几个与逼真度有关的概念:

准确度 (Accuracy) ——模型或仿真中参数、变量或者参数集、变量集与仿真对象或某种选定标准的一致程度。

精准 (Precision) ——模型表达或仿真运算的精确程度。

误差 (Error) ——观察值、测量值或者计算值与真实值之间的差异。

容差 (Tolerance) ——模型或仿真的属性值与仿真对象或某种选定标准相比能够允许的最大误差或差异。通常用加减标称值的多少百分比来表示。

5.1.3 仿真可信度

仿真系统是否可信,是用户最关心的问题,正确的仿真结果能够帮助用户避免决策失误,降低经济损失。可信度的问题贯穿整个 VV&A 的工作过程,在概念模型、仿真设计、仿真实现、仿真应用等阶段,都需要对该阶段涉及的仿真模型或仿真系统的可信性进行评估。

可信度就是由仿真系统与原形系统之间相似性决定的,仿真系统与仿真目的相适应程度。它主要包括主观和客观两个方面的内容:客观方面是指仿真模型或仿真系统在一定的相似形式下与被仿真对象的相似程度;主观方面是指基于现有相似程度,仿真模型或仿真系统能否满足 M&S 的预期应用的要求及满足要求的程度。

5.2 基本原则

在 VV&A 的实践中必须遵循一些基本原则和观点,它能够帮助 M&S 用户、M&S

开发人员、VV&A 代理更好更全面地理解 VV&A，制定合理的 VV&A 计划，提高 VV&A 工作效率。对仿真 VV&A 研究应遵循的主要原则包括：

原则 1 没有绝对正确的模型。由于模型是基于一定相似形式，在一定的相似程度上对客观事物的抽象和近似描述，相似程度为 1 的模型是不存在的。而且对于一个 M&S 应用来说是适用和可信的模型，对另一个应用来说不一定是适用并可信的。

原则 2 VV&A 是贯穿于 M&S 整个开发生命周期的活动。总的来讲，VV&A 在 M&S 开发生命周期中是一个迭代与循环的过程，VV&A 工作可以发现 M&S 中每个阶段存在的不足与错误，然后要求对此阶段的 VV&A 工作进行修改，再进行此阶段的 VV&A 工作，直到通过 VV&A 工作为此。

原则 3 对预期应用准确清楚的表达和阐述是 VV&A 的基础。对 M&S 预期应用的描述和表达都不够准确和清楚，所开发的 M&S 及其仿真结果也是没有实际意义的，所进行的 VV&A 工作也就没有价值和意义了。

原则 4 M&S 的可信度与预期应用紧密相关。M&S 的可信度包括客观和主观两个方面的因素：客观上是仿真模型或整个仿真系统与仿真对象在一定相似形式上的相似程度；主观方面则是基于 M&S 的应用目的来主观判断仿真模型和仿真系统所达到的相似程度是否满足 M&S 应用的可信性要求及达到可信性要求的程度。

原则 5 M&S 的验证不能保证从 M&S 应用中得到的分析结果的正确性和可接受性。M&S 的验证是从 M&S 应用中得到的分析结果正确和可用的必要条件，但不是充分条件，如果 M&S 的目的和需求描述本身就不清楚或不正确，那么分析结果就不可能正确。

原则 6 对于模型和联邦成员的 V&V (Verification and Validation) 不能说明整个仿真系统的可信性，反之亦然。每个子模型和联邦成员的误差处于允许的范围内，但是子模型和联邦成员的组合会带来误差的累积，从而可能导致整个仿真系统的误差超出允许的范围。反之亦然。

原则 7 对 M&S 的确认不是一个接受或拒绝的二值选择。M&S 在客观上只能是基于一定的相似形式，在一定的相似程度上对被仿真对象的抽象描述与近似，完全要做到在所有形式上的完全相似，根本就是不可能的。对 M&S 的确认应该表达 M&S 在多大程度上与 M&S 的开发目的相适应，也就是给出 M&S 的可信度。

原则 8 VV&A 既是一门艺术又是一门科学，需要 VV&A 人员有足够的创造性和洞察力。M&S 的 VV&A 工作并不是一个简单的选择和运用 VV&A 技术的过程。它要求 VV&A 人员对 M&S 的开发目的有深入透彻的理解，而且还需要具有 M&S 开发和应用的知识和经验。

原则 9 系统分析人员影响 VV&A 工作能否成功。仿真系统的分析人员需要参与并协助 VV&A 人员完成各个阶段工作，对 VV&A 工作的成功与否有重要影响。

原则 10 VV&A 工作必须有良好的计划和记录。VV&A 工作计划可以保证 VV&A

工作及时有效地开展。而 VV&A 工作的记录可以很好地对前阶段的 VV&A 工作进行总结,并促进下一阶段的 VV&A 工作的开展,使 VV&A 工作有据可查,保证 VV&A 工作的客观性和公正性,并可以提高 M&S 的可重用性。

原则 11 VV&A 工作需要一定程度的独立性。VV&A 人员通常由非 M&S 开发和设计人员担任,尽量减少 M&S 开发和设计人员对 VV&A 工作的公正性和客观性的影响。

原则 12 成功的 VV&A 包括相关数据的正确性。可信的仿真模型和仿真系统使用不正确和不适当的数据得出的仿真结果通常是不可信的。因此在 VV&A 过程中,相关仿真数据的正确性和有效性也需要被检测。

这 12 条原则来自于 VV&A 的概念和 VV&A 的方法,贯穿于整个仿真建模过程。理解和使用这些原则对于 VV&A 资源的有效利用和建模与仿真的可信应用都是必须的。

5.3 可信性保证技术和方法

5.3.1 校核与验证技术

随着仿真在各种领域的广泛应用,仿真方法和仿真技术也得到不断的提升。随着更多的新技术的应用,大大提高了仿真系统的功能和性能,与此同时,也对仿真系统的 VV&A 提出了更高的要求。目前, VV&A 技术主要包括可用于模型验证的 76 种 V&V 技术和 18 种统计技术,其中大多数是由软件工程衍生而来,其余则是建模与仿真领域内的特定技术。

应用于建模与仿真方法的 V&V 技术,可以粗略分为四大类:非正规方法(Informal)、静态方法(Static)、动态方法(Dynamic)和正规方法(Formal),具体内容如表 5-1 所示。

表 5-1 V&V 技术的分类方法

非正规方法					
过程审核		程序员自查		回顾法	
概念执行		图灵测试		代码会审	
静态方法					
原因效果图		控制分析		数据分析	
		调用结构分析	并行过程分析	数据依赖型分析	数据流分析
		控制流分析	状态转移分析		
接口分析		语义分析		结构分析	
模型接口分析	用户接口分析				
符号评估		语法分析		追溯性评价	

续表

动态方法									
接受测试		Alpha 测试			断言检验			Beta 测试	
自底向上测试		比较测试			调试			缺陷/错误插入测试	
兼容性测试		运行测试			接口/界面测试			对象流测试	
授权测试	性能测试	运行监	运行剖	运行跟	数据接	模型接	用户接		
安全性测试	标准测试	视测试	面测试	踪测试	口测试	口测试	口测试	预测性测试	
场地测试		功能测试			图形比较			产品测试	
特殊输入测试					结构测试			回归测试	
边界值输入测试	等效区间测试		极值输入测试		分支测试		条件测试		灵敏性测试
不正确输入测试	实时输入测试		自驱动输入测试		数据流测试		循环测试		符合调试
强度测试	路径驱动输入		统计技术		路径测试		说明测试		可视化动画
子模型/模块测试					自顶向下测试				
正规方法									
归纳法		推导法			逻辑推论法			归纳断言	
Lambda 微积分		谓词微积分			谓词变换			正确性证明	

(1) 非正规方法

非正规方法是指这种技术的使用方法更加依赖于人的主观推理和评估，而不是严谨的数学推理。这种方法的优点是简易直观，节约时间、人力，但它在理论上不严格，受人的主观因素影响，缺乏可信性。

(2) 静态方法

静态方法是对静态模型设计的逼真度的评估。静态方法不需要运行可执行代码，而是通过对其逻辑结构的分析，判断它的正确性，也可以运用现有的自动化工具辅助 V&V 过程，获得模型的结构、数据流、控制流等信息，提高 V&V 的效率和正确性。

(3) 动态方法

动态方法是需要动态地运行可执行代码，对模型运行的行为进行评估。为了更精确的评估模型，必须获得模型执行过程中的动态数据和状态，这通常需要加入输出模型状态和结果的执行代码，并根据静态方法的分析结果，确定输出代码的位置和输出内容。动态方法分为三个步骤：

- 确定加入输出代码的位置和内容；
- 运行可执行代码；
- 分析输出的状态和结果，评估模型精确度。

(4) 正规方法

正规方法是指有严谨的数学推理过程，它能够精确评估模型结构，证明模型是否正

确。但此方法的困难程度大,需要巨大的付出,应在建模过程的早期使用。由于该方法的技术局限性,基本不能运用到一个略微复杂的仿真系统中。

在战术通信仿真系统中应灵活运用这些 V&V 技术,分析各种方法的适用性和局限性,根据实际情况从不同角度选用多种方法对模型进行综合验证,然后对其验证结果进行分析。

5.3.2 仿真系统输出统计分析方法

统计技术在各类系统试验结果分析方面具有优势,在几百年的发展历程中,数理统计领域积累了大量的各类实用方法,它们是工程技术人员必不可少的分析和研究的工具。下面将介绍几种建模和仿真中经常用到的 VV&A 方法,有的方法应用起来需具备较高深的数学知识,这里不可能详述这些知识,如有需要请读者自行查阅相关文献。

1. 频谱分析法

作为定量的模型验证方法,频谱分析法适合对试验结果的动态性能的验证。其原理是:计算两个随机序列在频率域中的功率谱,通过比较功率谱的一致性来判断两个随机序列一致性的程度。

设功率谱 $f(\omega)$ 在两个时间序列的功率谱密度分别为 $f_1(\omega)$ 和 $f_2(\omega)$,下面对二者做经典频谱窗估计,求频谱密度函数估计值 $\hat{f}_1(\omega)$ 和 $\hat{f}_2(\omega)$ 。

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{t=-T+1}^{T-1} \omega\left(\frac{t}{M}\right) \hat{\gamma}(t) e^{-j\omega t} \quad (5-1)$$

式中, $\omega\left(\frac{t}{M}\right)$ 是延迟窗; $\hat{\gamma}(t)$ 是自相关函数。由谱估计的渐近性质可知:

$$\nu \hat{f}(\omega) / f(\omega) \sim \chi_\nu^2$$

其中 ν 为等价自由度,

$$\nu = \frac{2T}{M \int_{-\infty}^{+\infty} \omega(u)^2 du} = \frac{2T}{M \xi_\omega} \quad (5-2)$$

不同的窗函数, ξ_ω 值不同。

利用 $\hat{f}(\omega)$ 的渐近分布可对 $f(\omega)$ 作区间估计,置信度为 $(1-\alpha) \times 100\%$ 的区间为

$$\chi_{\nu, \alpha/2}^2 \leq \nu \hat{f}(\omega) / f(\omega) \leq \chi_{\nu, 1-\alpha/2}^2$$

即

$$\nu \hat{f}(\omega) [\chi_{\nu, 1-\alpha/2}^2]^{-1} \leq f(\omega) \leq \nu \hat{f}(\omega) [\chi_{\nu, \alpha/2}^2]^{-1} \quad (5-3)$$

按 $(1-\alpha) \times 100\%$ 置信区间比较 $f_1(\omega)$ 和 $f_2(\omega)$ 。 $f_1(\omega)/f_2(\omega)$ 可由式 (5-4) 给出:

$$\frac{\hat{f}_1(\omega)/\hat{f}_2(\omega)}{F_{\alpha/2}(\nu, \nu)} \leq f_1(\omega)/f_2(\omega) \leq \frac{\hat{f}_1(\omega)/\hat{f}_2(\omega)}{F_{1-\alpha/2}(\nu, \nu)} \quad (5-4)$$

$F_p(\nu, \nu)$ 表示分子、分母是自由度为 ν 的 F 分布第 P 次百分点。

如果置信区间上、下限包含 $f_1(\omega)/f_2(\omega)=1$ ，则该频率点上两个时间序列是相等的。要使两个时间序列相等，它们的频谱必须在所有频率 $\omega_j (j=0,1,2,\dots,n)$ 均相等。因此，如果在每个频率上置信区间都包含 1，则仿真结果得到验证。

2. 贝叶斯方法

贝叶斯统计方法是一种基于未知分布参数的验前信息及样本信息进行统计推算的方法。近年来，贝叶斯方法已经广泛应用于通信、控制、人工智能、地震、气象预报、经济管理、国防及系统通信仿真等诸多领域。在系统仿真领域，贝叶斯方法不仅可以用于仿真输出结果分析，而且还是仿真系统模型验证的一种重要且实用的方法。

我们知道，仿真系统模型的建立及运行都是在一些重要假设条件下进行的。系统越复杂，所做的假设也就越复杂，对仿真结果的可信性影响就越大。模型假设可分为结构性假设和数据假设。其中结构假设包括对实际系统的简化和抽象，或者说是系统最低限度的运行条件。而数据假设包括对所有输入数据和概率分布所做的规定。

模型验证的贝叶斯方法，是一种基于贝叶斯理论对模型结构假设进行检验的方法。

设被仿真对象的数学模型可用常系数线性微分方程描述如下：

$$\dot{x}^i(t) = A^i x^i(t) + b^i u(t) + c^i v^i(t) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5-5)$$

式中， $x^i(t)$ 为状态向量， $u(t)$ 为控制向量， $v^i(t)$ 为白噪声向量； n 为可能的方案数目。

例如，在对飞行器的稳定性和操纵性进行仿真研究时，就需要采用小扰动法和系数冻结法，将描述飞行器运动的六自由度非线性微分方程化为式 (5-5) 所示的常系数线性微分方程式。

对式 (5-5) 离散化，得

$$x_{k+1}^i = \Phi^i x_k^i + B^i u_k + S^i v_k^i \quad (5-6)$$

式中， $\Phi^i = e^{A^i T}$ (常数)；

$T = t_{k+1} - t_k$ (离散化步距)；

$B^i = \Phi^i b^i T$ ；

$S^i = \Phi^i c^i \sqrt{T}$ 。

设观测方程为

$$z_k = h^i x_k^i + \sigma^i u_k$$

并设初始状态 $x^i(t_0)^i = x_0^i$ 。在离散化方程的方案下， Φ^i 、 B^i 、 S^i 、 h^i 、 σ^i 及 x_0^i 是相应维数的常系数矩阵 (某些是未知矩阵)，并表示为

$$\alpha^i = (\Phi^i, B^i, S^i, h^i, \sigma^i, x_0^i)$$

定义对应 n 种可能模型的 n 个假设, 即 H_0, H_1, \dots, H_n , 且已知 t_0, t_1, \dots, t_N 时刻的系统控制向量 u_0, u_1, \dots, u_N 和相对应时刻的观测结果 z_0, z_1, \dots, z_N 。

应用贝叶斯方法, 对模型结构假设进行检验的问题提法是: 给定上述描述的系统的输入 $u_N = (u_0, u_1, \dots, u_N)$ 和系统的观测输出 $z_N = (z_0, z_1, \dots, z_N)$, 要求从既定方程类中确定出模型阶段和结构的最可信假设 $H \in \{H_i : i=1, 2, \dots, n\}$ 。下面应用贝叶斯假设检验方法求解上述的模型假设检验问题, 这里只讨论简单假设的情况。

设系统模型只有两种可能的方案: 假设 H_1 和假设 H_2 。为此, 可将普通形式的贝叶斯损失看成与系统模型采用的假设 H_1 和假设 H_2 有关的贝叶斯可能损失, 它可表示成

$$\begin{aligned}
 B &= \sum_{i,j=1}^2 \int_{L_i} C_{ij} P(z^N, \alpha^j, H_j) dz^N \\
 &= \sum_{i,j=1}^2 C_{ij} P(H_j) \int_{L_i} P(z^N | \alpha^j, H_j) dz^N \\
 &= C_{11} P(H_1) \int_{L_1} P(z^N | \alpha^1, H_1) dz^N + C_{12} P(H_2) \int_{L_1} P(z^N | \alpha^2, H_2) dz^N \\
 &\quad + C_{21} P(H_1) \int_{L_2} P(z^N | \alpha^1, H_1) dz^N + C_{22} P(H_2) \int_{L_2} P(z^N | \alpha^2, H_2) dz^N \quad (5-7)
 \end{aligned}$$

式中, L_1 和 L_2 是 z^N 的备选空间, $L_1 + L_2 = L$; C_{ij} 即为在 H_j 是正确的条件下选择 H_i 所产生的损失; $P(H_j)$ 为假设 H_j 的先验概率; $P(z^N | \alpha^j, H_j)$ 为当假设 H_j 及 α^j 固定时, 观测向量 z^N 的条件密度。

并集 L 应同全部 z 的观测空间重合; 如果 $z \in L_1$, 则采用假设 H_1 ; 如果 $z \in L_2$, 则采用假设 H_2 。通常不能认为哪一个假设是可信的, 所以必须估计所采用的假设及由此引起的误差。在 z^N 给定和用极大似然估计 α^j 的条件下, 通过对式 (5-7) 的贝叶斯可能损失最小化方法, 得到如下检验规则:

当 $\sum_{j=1}^2 C_{1j} P(H_j) P(z^N | \alpha^j, H_j) > \sum_{j=1}^2 C_{2j} P(H_j) P(z^N | \alpha^j, H_j)$ 时, 采纳 H_1

当 $\sum_{j=1}^2 C_{1j} P(H_j) P(z^N | \alpha^j, H_j) < \sum_{j=1}^2 C_{2j} P(H_j) P(z^N | \alpha^j, H_j)$ 时, 采纳 H_2

由此可见, 上述简单假设的贝叶斯检验规则与损失 C_{ij} 、先验概率 $P(H_i)$ 以及条件概率密度 $P(z^N | \alpha^j, H_j)$ 有关。

在实际应用中, 认为采用正确假设时损失不存在, 即 $i=j$ 时, $C_{ij}=0$, 当 $i \neq j$, C_{ij} 均为同一常数。当具有多种假设时, 在各种模型的损失相互独立的情况下, 进行每对问题的比较, 选用任何一种模型的概率认为是等同的。

3. 置信区间法

置信区间法 (confidence interval method) 可以给出具有一定置信度的真值的存在范

围,是定量计算可观测传统仿真模型精度的一种有效的方法。这里假设既可以从仿真模型也可以从现实系统收集大量数据。

按终态仿真的思想,假定我们从系统收集 m 个独立数据序列,并从仿真模型中收集 n 个独立数据序列,令 X_j 是现实系统的第 j 个序列观测数据的均值, Y_j 是仿真系统的第 j 个序列观测数据的均值。 X_j 是具有均值为 $\mu_x = E(X_j)$ 的独立同分布随机变量(假定模型的 n 个数据序列是由独立实验产生的),我们将 $\xi = \mu_x - \mu_y$ 构造一个置信区间以比较系统和模型。这里对 ξ 构造一个置信区间来做检验,而不是定义一个零假设 $H_0: \mu_x = \mu_y$,理由有二:一是由于模型是指一个对现实系统的近似, H_0 几乎在所有情况下都不为真;二是由于置信区间比对应的假设检验提供了更对的信息,若假设检验指出 $\mu_x \neq \mu_y$,则置信区间将会提供这个信息,同时还给出 μ_x 与 μ_y 的数值差异。

有两种方法可以对 ξ 构造一个置信区间:配对 t 置信区间估计方法和维尔奇(Welch)置信区间估计方法。

(1) 配对 t 置信区间估计方法

若 $m = n$,且 X_i 与 Y_j 可以配成对,定义 $Z_j = X_i - Y_j (j=1,2,\dots,n)$,则 Z_j 是独立同分布随机变量,而 $E(Z_j) = \xi$ 就是我们要为之构造置信区间的量,于是令

$$\bar{Z}(n) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_j$$

以及

$$S^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [Z_j - \bar{Z}(n)]^2$$

则导出近似的 $(1-\alpha) \times 100\%$ 的置信区间为

$$\bar{Z}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \quad (5-8)$$

(2) 维尔奇(Welch)置信区间估计方法

维尔奇置信区间估计方法不需要由现实系统和仿真系统模型的观测值成对取出,但是严格要求 X_j 独立于 Y_j 。

$$\bar{X}(m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_j, \quad \bar{Y}(n) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_j$$

$$S_1^2(m) = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m [X_j - \bar{X}(m)]^2, \quad S_2^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [Y_j - \bar{Y}(n)]^2$$

则近似的 $(1-\alpha) \times 100\%$ 的置信区间为

$$\bar{X}(m) - \bar{Y}(n) \pm t_{v, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S_1^2(m)}{m} + \frac{S_2^2(n)}{n}} \quad (5-9)$$

式中 ν 是 t 分布的自由度估计值, 按下式计算:

$$\nu = \frac{\left[S_1^2(m)/m + S_2^2(n)/n \right]^2}{\frac{\left[S_1^2(m)/m \right]^2}{m-1} + \frac{\left[S_2^2(n)/n \right]^2}{n-1}} \quad (5-10)$$

我们既可以用配对 t 置信区间估计方法也可以用维尔奇置信区间估计方法对 ξ 构造一个置信区间。配对 t 法需要 $m=n$, 但允许 X_j 与 Y_j 相关。维尔奇法可用于任意 $m>2$ 和 $n>2$ 的情况, 但要求 X_j 独立于 Y_j 。

假定用配对 t 法或维尔奇法已对 ξ 构造一个 $(1-\alpha) \times 100\%$ 置信区间, 并令 $l(\alpha)$ 和 $u(\alpha)$ 分别对应置信区间的下限点和上限点, 若 $0 \notin [l(\alpha), u(\alpha)]$, 则 u_x 和 u_y 之间的观测差 $\bar{X}(m) - \bar{Y}(n)$ 被称为具有统计显著度, 这等效于拒绝零假设 $H_0: u_x = u_y$, 因而倾向于假设 $H_1: u_x \neq u_y$ 。若 $0 \in [l(\alpha), u(\alpha)]$, 则 u_x 和 u_y 之间的观测差没有统计显著度, 而且这种情况也可能是由于采样波动引起的。则 u_x 和 u_y 之间的观测差具有统计显著度时, 也不意味着仿真系统采用的模型不是现实系统的有效代表, 例如若 $\xi=1$, 而 $u_x=1000$, $u_y=999$, 则现实系统与模型之间的差别也许非常微小, 如果差别大到足以推断出基于模型的仿真系统无效的话, 我们将认为模型与现实系统之间的差别实际上是显著的。决定模型与系统之间的差别实际上显著与否, 是一个主观问题, 这取决于模型的目的以及使用模型的人的效用函数等因素, 下面举例说明。

例如, 根据某发动机地面试车数据, 假定已建立了发动机某参数的正态分布模型。由此仿真模型产生出一组模拟数据 X , 再对发动机进行地面试车, 获得另一组反映发动机同一参数性能的实际数据 Y , 两组数据如下:

X_j	0.994570	0.989843	0.992003	0.995662	0.987338	0.97718	0.971935	0.996443
X_j	0.995421	0.985820	0.995916	0.988551	0.986710	0.985244	0.978873	0.981318

考虑模拟数据与实际数据之间相关, 采用配对 t 置信区间估计方法, 首先配对构成新的序列 Z , 具体值如下:

Z_j	0.000851	-0.004023	0.003913	-0.008111	-0.000628	0.008126	0.006938	-0.015125
-------	----------	-----------	----------	-----------	-----------	----------	----------	-----------

对 Z 计算得到 (样本容量 $n=8$)

$$\bar{Z}(n) = -0.001007$$

$$S^2 = 0.000054152$$

取显著水平 $\alpha=0.05$, 查表得 $t_{n-1, \alpha/2} = 2.3646$ 。根据配对 t 法求出置信度为 95% 的置

信区间为 $(-0.007159, 0.005145)$ 。分析得到的置信区间值,可得到如下两点结论:

- ① 由于该置信区间包含了0,则可判断在置信度95%下两组数据性能无显著差异;
- ② 假定该模型的可接受精度范围为 $(-0.1, 0.1)$,则该置信区间满足精度范围要求,从而可判断该模型是有效的,且模型的可信度在95%以上。

5.3.3 可信度评估方法

可信性评估与VV&A之间的关系非常密切。美国国防部在VV&A RPG中指出“模型与仿真的可信性可通过校核与验证测量,最后确认证明其满足特定的应用目的。”可信性评估与VV&A之间的关系存在两个方面:一方面,确定模型与仿真的可信性是VV&A的重要目标,在VV&A中时刻要考虑数据、模型和仿真的可信性;另一方面, VV&A为可信性评估提供数据、方法和工具支持,进行可信性评估时要充分利用VV&A的成果。

从定性分析的角度,可信性评估与VV&A之间的关系主要包含以下几点:

- 校核是验证的前提和基础,校核为验证提供范围和依据,只有通过了校核后验证才有意义;
- 验证中发现了问题要回到校核阶段,对系统进行必要的修正,因此校核和验证中有重叠的部分;
- 只有通过了校核和验证的系统才可进行确认,确认建立在仿真系统V&V的基础上;
- 可信性是仿真系统VV&A的重要目标和核心, VV&A为可信性评估提供数据、方法和工具支持;
- 可信性研究贯穿于VV&A全过程和仿真系统开发与应用的全生命周期。

从定量计算的角度,校核通常是对系统的结构进行分析,据此建立影响仿真可信性的因素的集合,并确定各因素对仿真可信性的影响;验证是将仿真数据与真实世界的有关数据进行比较,从功能角度判断仿真中各因素的表现是否符合实际情况,据此求得各因素的可信度分量。

仿真试验必须基于可信的仿真系统来进行,这样仿真结果才具有可用性及实际意义。为了保证仿真系统的可信性,必须在仿真系统的设计、开发和运行全过程中进行VV&A。对于数学仿真系统而言,确保数学仿真模型的可信性至关重要,前面已经对数学仿真模型的校核与验证方法进行了研究,从而使数学仿真模型的可信性得到了保证。然而,如何分析综合起来的数学仿真模型,从而得到整个数学仿真系统的总体可信度就成为进一步要研究的问题。

在工程实践中,评估数学仿真系统往往要综合运用多种方法和手段,一般说来,评

估手段不同,得到的评估结论也可能不同,有时甚至大相径庭。所以,要想给出一个可操作的、适用于任何仿真的、能够综合反映仿真各个方面性能的评估模型几乎是不可能的。针对数学仿真系统校核与验证结果的实际特点,结合系统工程领域相关的理论和方法,我们主要从定性和定量的角度分析了层次分析法、模糊综合评判法、模糊层次分析法和灰色关联分析法在可信度综合评估中的可用性和合理性,并根据所研究的成果开发了可信度综合评估软件。

1. 层次分析法 (AHP)

层次分析法将人的主观判断用数量形式进行表达和处理,是一种定性定量相结合的多准则决策方法。AHP 方法把复杂问题分解成各个组成部分,并将这些组成部分按支配关系分组形成多层次的递阶结构;然后通过两两比较的方法确定同一层次中各因素的相对重要性;最后综合决策者的判断,确定被选方案相对重要性的总排序。AHP 方法体现了人们决策思维的基本特征,即分解—判断—综合,这也是系统仿真可信性评估分析的基本过程。

运用 AHP 方法进行决策时,大体上可分为以下四个步骤:

(1) 分析系统中各因素之间的关系,提出可信度评价指标,建立系统的多层次递阶结构。评价指标的选择由评价目标与实际情况共同决定,具体选择应注意以下几点:

- 评价指标必须与评价目的和目标密切相关;
- 评价指标应当构成一个完整的体系,即应当全面地反映所需评价对象的各个方面;
- 评价指标总数应当尽可能地少,以降低评价负担。

(2) 对同一层次影响因素的重要性进行两两比较,构造两两比较判断矩阵。判断矩阵中元素的含义为同一层上两个影响因素对上一层某影响因素可信度影响程度的比值。判断矩阵 A 可写成:

$$A = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \cdots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \cdots & W_2/W_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \cdots & W_n/W_n \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

应该选择合适的标度方法将判断矩阵定量化,定量化后得到的判断矩阵应该满足完全一致性条件:

- 判断矩阵的对角线元素为 1;
- 判断矩阵的右上三角和左下三角对应元素互为倒数;
- 判断矩阵中的元素满足传递关系:

$$b_{ij} = \frac{b_{iA}}{b_{jA}}, i, j, k = 1, 2, \cdots, n \text{ 且 } i \neq j, \text{ 式中 } b_{ij} = W_i/W_j \quad (5-12)$$

(3) 计算各层次影响因素的权重, 并进行一致性检验。

计算权重的方法主要有乘积方根法和求和平均法(代数平均法), 而且乘积方根法的精度要高于求和平均法。另外, 为了要使得到的权重有意义, 判断矩阵必须具有满意的一致性。判断矩阵的一致性可以用判断矩阵的一致性指标 CI 与同阶次的平均随机一致性指标 RI 之比来进行判断。

判断矩阵的一致性指标 CI 定义为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5-13)$$

式中, λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根, n 为判断矩阵的阶次。

当随机一致性比率 CR 满足条件:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0.10$$

时, 判断矩阵具有满意的一致性。

(4) 根据各影响因素的权重评估仿真系统的总体可信度。

仿真系统的总体可信度可以通过公式 $S = \sum_{i=1}^n W_i S_i$ 求出, 其中 W_i 是各主指标的权重, S_i 是各主指标的可信度。

2. 模糊综合评判法

模糊数学是研究不确定性系统的常用方法之一, 适合于具有“内涵明确, 外延不明确”特点的对象以及对系统进行评估。模糊综合评判法是应用模糊数学中的模糊变换原理和最大隶属度原则, 考虑与被评价事物相关的各个因素, 对其所作的综合评价。

模糊综合决策的数学模型由三个要素组成:

因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$; 评判集(或评价集) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$; 单因素评判 $f: U \rightarrow \xi(V)$, $u_i \mapsto f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in \xi(V)$, 进而由模糊关系 $R_f \in \xi(U \times V)$

得出模糊矩阵 $R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$, 也称作单因素评判矩阵, 称 (U, V, R) 构成一个

模糊综合决策模型, U, V, R 是此模型的三个要素。完成以上三要素构建后就进行综合评判, 综合评判 $B = A \circ R \in \xi(V)$, 其中 A 为权重 $A \in \xi(U)$, “ \circ ”表示算子, 运算中的方法。在评价中算子模型有四种, 如表 5-2 所示。

表 5-2 常见模糊算子的数学模型

模型	算子	计算公式	类型
$M(\wedge, \vee)$	$\wedge \vee$	$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$	主因素决定型
$M(\bullet, \vee)$	$\bullet \vee$	$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \bullet r_{ij})$	主因素突出型
$M(\wedge, \oplus)$	$\wedge \oplus$	$b_j = \bigoplus_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) = \sum_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$	主因素突出型
$M(\bullet, \oplus)$	$\bullet \oplus$	$b_j = \bigoplus_{i=1}^n (a_i \bullet r_{ij}) = \sum_{i=1}^n a_i \bullet r_{ij}$	加权平均模型

模糊数学有两种运算——上确界“ \vee ”与下确界“ \wedge ”， $a \vee b = \sup[a, b]$ ， $a \wedge b = \inf[a, b]$ ，并满足下列运算性质：

幂等律： $a \vee a = a, a \wedge a = a$ ，

交换律： $a \vee b = b \vee a, a \wedge b = b \wedge a$ ，

结合律： $(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c), (a \wedge b) \wedge c = a \wedge (b \wedge c)$ ，

吸收律： $(a \vee b) \wedge a = a, (a \wedge b) \vee a = a$ ，

其中，模型 $M(\wedge, \vee)$ 的着眼点考虑主要因素（先取小后取大运算），其他因素对结果影响不大，容易出现决策结果不易分辨的情况。在实际应用中，主因素（权重最大的因素）在综合评判中起主导作用时，可采用前三种模型，而模型四是对所有因素依权重大小均衡兼顾，适用于整体指标的优化。

因素集 U 相当于评价指标集，其中 u_i 表示具体的指标，如对仿真系统进行评价，因素集可定义为 $U = \{\text{可靠性, 可维护性, 可信度, 使用性能, } \dots\}$ 。

评判集 V 是对因素等级或等次的可能评估值或评估描述。例如按四级评价 $V = \{\text{优秀, 良好, 及格, 不及格}\}$ ，相应地，可以将其量化为 $V = \{0.90, 0.80, 0.60, 0.25\}$ 。

明确因素集和评判集之后，将其进行模糊转换可以得到模糊评判矩阵，最后进行模糊综合评判。

3. 模糊层次分析法（Fuzzy-AHP）

在仿真可信度评估中，经常将上面两种方法综合使用，以解决单独使用时出现的问题。通过研究分析，模糊层次分析法的步骤可以分成：建立层次结构、构造单因素评判矩阵、初级综合评判、高级综合评判和结果分析。

建立层次结构主要通过层次分析法将待评估仿真系统的各个影响因素层次化，建立因素集，如图 5.1 所示。

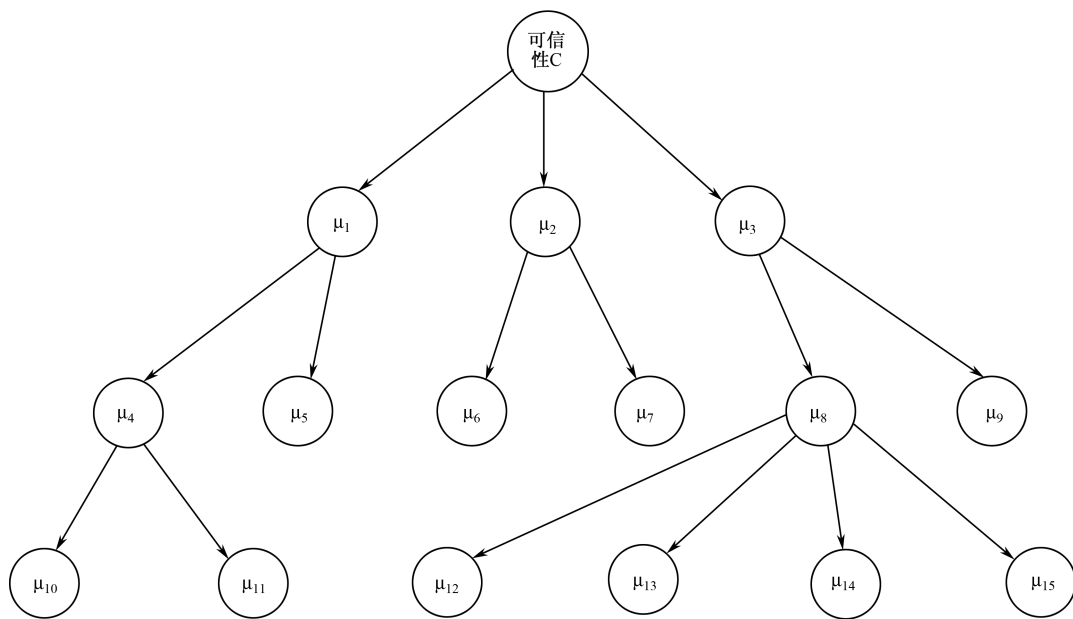


图 5.1 可信性评估因素的递阶层次结构

构造单因素评判矩阵是通过模糊变换原理，选择可信性评估的基本因素，进行单因素评判，包括建立单因素评判决策集、构造重要性两两比较矩阵、计算权重向量、进行一致性检验和计算单因素评判的可信度 5 个环节。

初级综合评判主要用于基本因素评判结果的综合。高级综合评判建立在初级综合评判的基础上，通过初级综合评判，我们已将基本因素的评判综合到上一层次。在高级综合评判中，把低一层的评判结果向量作为一个模糊向量，多个低层模糊向量的综合可构成高一层的模糊评判关系矩阵，对关系矩阵进行模糊合成运算从而求得高一层的综合评判值。

结果分析是对得到的模糊向量进行数据处理，采用的方法有最大隶属度原则、模糊分布法、加权平均法和评判集决策法。

模糊层次分析法在于具有 AHP 方法本身的优点，还由于模糊数的应用，不但发挥了专家经验的作用，而且还尽量减少了人为主观臆断带来的弊端，使得所计算的权重更加科学合理且易于实现。

比如在采用模糊评判法时，由于要满足归一性，每一因素分得的权重必然很小，无论采用哪种算子，经过模糊运算后都会淹没许多信息，有时甚至得不出任何结果，模糊层次分析法可以较好地解决这一问题。

此外,针对因素权重的分析可以利用模糊数学中的三角模糊数来构造两两构造矩阵,该方法试图从数学方法上避免人为因素对判断矩阵的影响,以使评估更客观。

4. 灰色关联分析法

灰色关联分析法是对灰色系统中各因素相互关联程度进行分析的一种方法。基本思路:首先求各个因素与最优因素之间的关联系数;而后,由关联系数得到关联度;再按关联度的大小进行排序、计算,得出结论。该法对数据资料的分布类型和样本量无严格要求,也不需提供评价的参照标准,且较准确地反映了评价单位的空间分布规律。

确定综合评判因素的权重集,实质上是寻找事物内部各种影响因素之间的相互关系,在许多情况下,并不能清楚地知道这种关系,因为事物与其影响因素共同构成的是一个灰色系统,人为地确定一个权重集,常常是凭主观印象将原来灰色的关系用打分的方法使其白化,不可能深入挖掘数据的内部结构信息,特别是在相互关系比较复杂,表面现象及变化随机性掩盖了事物本质的情况下,得不到全面、足够的信息,这种“白化”的方法是不可靠的。灰色问题最适合用灰色系统分析法。灰色关联分析,是分析因素与因素之间相关程度的一种简便而科学的方法,其结果较为客观。

灰色关联分析法的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的关联度越大,反之越小。

基于灰色关联分析的权重确定步骤如下:

第1步:收集整理原始数据,建立灰关联集:

$X = \{x_0, x_1, \dots, x_m\}$ 为因子集, x_0 为参考序列, x_i 为比较序列, $x_0(k)$ 、 $x_i(k)$ 分别与 x_0 、 x_i 的第 k 个点的数对应。

第2步:求各数据序列的初值像或进行无量纲初始化处理;

$$x'_0(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i(k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5-14)$$

第3步:求各点的绝对差值:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x_i(k)| \quad (5-15)$$

$$\Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

第4步:求两极最大差与最小差:

记两极最大值 $\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_i(k)$, 两极最小值 $\Delta_{\min} = \max_i \max_k \Delta_i(k)$

第5步:利用公式计算关联系数 γ :

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \xi \Delta_{\max}}, \quad \xi \text{ 为分辨系数, 且 } \xi \in (0, 1), \text{ 它是为了削弱最大绝对差值因}$$

过大而失真的影响,以提高关联系数之间的差异显著性而给定的系数。 $k = 1, 2, \dots, n$; $i = 1, 2, \dots, m$ 。

第 6 步：计算关联度：

$$\gamma_{0k} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_{0i}(k), \quad k=1,2,\dots,n$$

第 7 步：对计算得到的各因素关联度进行归一化，利用公式 $\gamma_j = \gamma_k / (\sum \gamma_k)$ 求出各因素在评估的系统中所占的权重。最后，结合各因素可信度计算得到系统的可信度。

灰色关联分析法在应用中要注意：一是该方法不考虑数据序列的平均距离，与数据序列在空间中的相对位置没有关系；二是对评估的系统要有原始的数据序列，比较适合用于综合评估中底层因素关联程度的确定。

5.4 战术通信仿真可信性保证的工程方法

5.4.1 人员组织安排

M&S 整个生命周期中涉及的人员可以简单地划分为三方：M&S 用户、M&S 开发者和 VV&A 代理。通常 VV&A 代理被称为 M&S 的第三方，它在一定的程度上独立于 M&S 用户和 M&S 开发人员。而 VV&A 代理通常可以分为 V&V 代理和确认代理。

M&S 用户：通常是 M&S 的发起方和 M&S 的使用者，主要负责参加确认计划的制定和确认决策的形成。

M&S 开发者：按照特定的需求说明和相关规范，负责开发或修改仿真的个人、组织或机构，在整个 VV&A 活动期间，将辅助 VV&A 代理的工作，提供相应的支持。

V&V 代理：由 M&S 用户指定的、负责对 M&S 进行 V&V 工作的个人、组织或机构，主要负责校核与验证工作，并将收集整理的结果提交给确认人员，为确认工作做准备。

确认代理：由 M&S 用户指定或相关文件规定的，负责对 M&S 的可接受性进行评估的个人、组织或机构，主要负责全面落实 VV&A 计划，并进行确认工作，保证 M&S 的可信度。

在 M&S 开发过程中，M&S 用户需要确保 M&S 需求被清楚地定义并被 M&S 开发人员准确地理解，还需要在 M&S 开发者与 V&V 代理间建立起一种正式的联系，同时 M&S 用户也需要与确认代理建立一种正式的联系；而 V&V 代理和确认代理也需要与 M&S 开发者特别是 M&S 开发方的管理人员建立一种正式的联系。这些正式联系的建立可以保证 V&V 代理和确认代理及时获得必须的信息，有利于 VV&A 工作的顺利开展。

在 M&S 开发全过程中，与 VV&A 相关的工作主要包括：M&S 需求定义、制定确认计划、制定 V&V 计划、V&V 工作的实施、撰写 V&V 报告、确认评估和撰写确认报

告等。VV&A 相关人员的职责可以分为：辅助、监控、审阅、批准、执行等，他们的关系如图 5.2 所示。

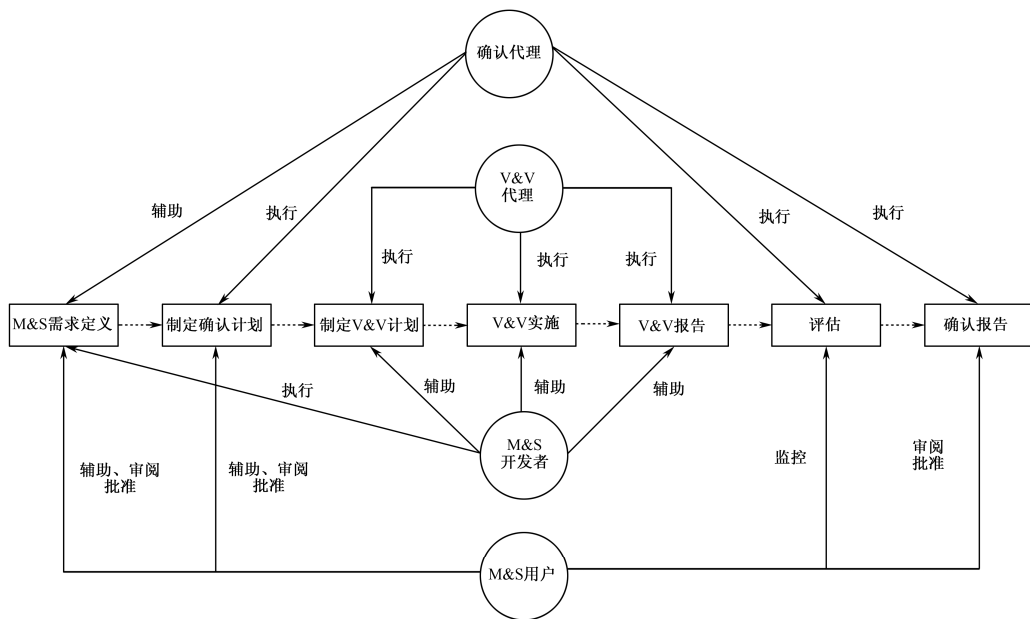


图 5.2 VV&A 相关人员的工作和职责

在战术通信仿真系统中的人员也应严格分为以上三类。需要特别指出的是 VV&A 代理的选择，在很多仿真系统的开发过程中，M&S 用户没有认识到 VV&A 的重要性和必要性，只是对 M&S 开发感兴趣，对 M&S 开发人员分配比例较重，只分配了少量人员从事 VV&A 代理工作，或者直接安排 M&S 开发人员进行 VV&A 代理的工作。这样做使得 VV&A 工作进行不彻底，M&S 开发人员不能够发现自己设计模型的问题，或者不愿意指出自己设计模型的问题，造成 VV&A 形同虚设，不能够真正发挥它的作用。M&S 用户不仅要保证 VV&A 代理人员的数量，保证评估工作的独立性，而且尽量选择在 VV&A 工作所需专业领域方面具有权威的人员从事 VV&A 代理工作，因为在校核验证的过程中常常运用到非正规的方法，此时，人的主观判断是非常重要的，有相关经验的人做出的判断可靠性高，可信性强，能够保证 V&V 的正确性。

5.4.2 执行过程

仿真系统从提出仿真目的开始，经历了需求分析、设计、实现、测试等过程，仿真系统开发过程每往前推进一步，都必须进行相应的 VV&A 工作，保证仿真系统的可信性，仿真系统的开发工作与 VV&A 过程互相交织在一起，是一个反复迭代的过程，密不可分，它们的关系如图 5.3 所示。

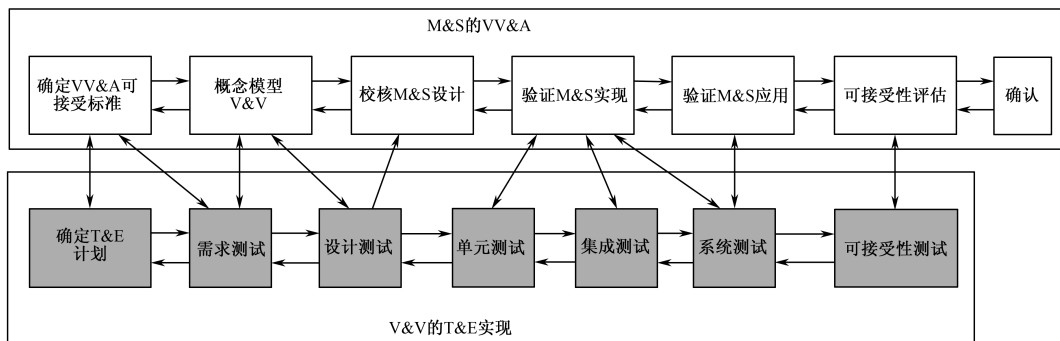


图 5.3 VV&A 与仿真关系

VV&A 过程是指开展 VV&A 工作的工作流程，严格执行 VV&A 过程，可以确定模型和仿真系统的可信性，降低风险，它一般分为八个步骤执行。

1. 仿真需求校核

明确需求是仿真设计的第一步，正确的需求是保证仿真系统可用性的必要条件，主要分为以下几部分：

- 明确仿真目的；
- 确定仿真实实现的主要功能；
- 确定仿真逼真度。

在这个阶段，VV&A 的主要工作是对用户需求报告进行重新审核，审核主要内容包括正确性、完整性、一致性和现实性，主要采用人工检查审核等非形式化的方法。

通过重新审核，对用户的需求和应用有了清晰的理解，使仿真的需求变得简单明了，此时需要确定 VV&A 需求，为后续的 VV&A 工作提供指导和依据。

VV&A 需求是 VV&A 工作的开始，它主要包括：VV&A 工作所要进行的程度与范围、各阶段所要选用的 V&V 技术、确定校核与验证代理、准备 VV&A 工作所需的硬件和软件、确定所需的工时数和费用等。

在战术通信仿真系统中，确定仿真需求是一个复杂、关键的过程。战术通信系统是一个规模巨大，网元种类繁多，网络节点数量庞大，网络拓扑复杂，实际应用灵活的大型通信系统。对这种复杂大型系统，如果对所有情况完全仿真，必定耗费大量的人力、物力，造成仿真周期冗长，资金耗费巨大，并且这种所有情况都考虑到的仿真，必定非常复杂，一般的仿真软件都不能够支持，或者仿真试验所耗费的时间、资源不被 M&S 用户所接受，必须通过需求分析，确定用户的目的，找出仿真重点，才是可行的仿真方式。

确定战术通信仿真系统的需求，不仅需要同 M&S 用户讨论确认，还需要对战术通信系统内的设备、节点、应用有一定的了解。由于 M&S 用户一般对仿真软件并不是很了解，可能提出的需求脱离了实际可能，这就需要与 M&S 用户反复沟通，选择适合仿

真目的和功能要求的仿真软件平台,综合分析战术通信系统的特点,对仿真目的进行修正,明确仿真需要实现的主要功能。

对战术通信系统这种复杂的大型系统,如何确定仿真的逼真度是一个难点。因为仿真是对真实世界的模拟,既然是模拟,就存在在着差异,差异有一个累积的过程,可能对单个协议或单个节点,它的差异很小,但在大型的仿真系统中,有复杂的应用,比如多个设备组成一个节点,多个节点组成一个子网,多个子网又组成更大的子网,这样差异迭代累积,与真实世界的差异就会越来越大,在怎样的差异范围内,仿真结果是能够被认可的,这就需要对不同层次的模型分别提出逼真度,不能够一概而论。

2. 编制 VV&A 计划

VV&A 计划的开发是一个复杂的过程,它的制定要与仿真的应用和开发方案相结合,包括仿真系统的总体情况、系统开发的基本方案、确认代理、主要模型及关键数据、仿真需求及可接受性判据等,要保证每一项计划的可实施性,与仿真应用的需求、限制条件以及选择的仿真工具相适应,计划的制定要完善,必须考虑到所有重要的仿真问题,并具有灵活性,易于操作。

在最初阶段 VV&A 计划是可调整的,当仿真需求或在 V&V 过程中,有新的情况和变化时,应对 VV&A 计划相对应部分重新进行评估,确定修订内容,保证 VV&A 计划与仿真开发的同步匹配。

VV&A 计划的主要内容包括:V&V 工作步骤及时间安排、主要的 V&V 对象以及所用的技术方法、V&V 代理的具体分工、数据的 VV&C 计划等。

3. 概念模型校核与验证

概念模型是把建模要求转化为详细设计框架的具体方法,校核概念模型是为了满足功能性需求,验证是满足逼真度的要求。为了避免仿真模型的不准确和设计缺陷,必须进行概念模型的校核与验证,这样能够尽早发现错误,减少后续的开发费用,避免重新设计延误整个仿真系统的开发进度。

为了严格执行概念模型的校核与验证,所有校核与验证的过程都应该有文档记录,说明建模的假定、算法、所期望的数据的有效性、概念模型结构等是否满足预期应用需求及其原因。

在战术通信仿真系统中,概念模型的校核与验证分为两个步骤进行,第一部分是对总体的校核验证,第二部分是对部分的校核验证,主要是系统划分的校核验证。

第一部分:由于战术通信系统是复杂的大系统,采用一般的仿真难以描述,应采用单机仿真与分布式半实物仿真相结合的方式,VV&A 的工作就是对这种仿真方式的校核。单机仿真的仿真规模较小,可以对一些协议、简单应用、关键技术进行仿真分析;分布式仿真可以弥补单机仿真规模受限的缺点,可以全面模拟整个系统的网络规模、网

络拓扑,以及在不同作战情况下,整个网络的通信情况。

第二部分:在战术通信仿真系统中需要用到分布式半实物的方法,概念模型校验的工作主要是针对各子系统模型的划分是否合理,各子系统间的关系描述是否完善、正确(主要指参数传递),假设、限制条件的描述是否合理等方面来开展。

4. 设计的校核与验证

在概念模型设计完成后,M&S 开发者需要对概念模型的软件编码和硬件环境构造进行详细设计,在基于概念模型的基础上产生仿真行为的组件、元素和功能函数,并确定它们的特定表达形式。

设计的校核是指为保证设计转化过程相对概念模型保持一致性和精确性,在软件等代码编写或硬件环境构造之前对整个详细设计过程进行审核的过程。

在战术通信仿真系统中,仿真模型主要分为网元模型和网络模型。

网元模型是建立网络模型,运行网络仿真的基础,它的准确性直接关系到网络仿真模型和仿真结果的可信度。在战术通信仿真系统中网元模型主要包括:各种有线链路模型,无线链路模型,如短波无线信道模型、超短波无线信道模型、UHF 无线信道模型、微波模型等,还包括各种设备模型。设备模型设计的关键是对设备对应的关键协议的进程模型的设计,如短波、超短波、高速数据电台的媒体接入控制层协议和数据链路层协议,路由交换设备采用的路由协议,终端设备的应用层协议等。网元模型的校核是对新建或修改的网元模型进行审核的过程。校核的内容主要包括:模型转换的一致性,模型设计的合理性和模型实现的正确性。网元模型的校核主要采用的方法包括:程序员自查、语法分析、语义分析、调试、运行跟踪、结构测试等。

网络模型是指仿真中由子网、节点、链路、设备等网元模型和地理环境来描述的网络拓扑。网络模型是由网元模型组成的,仿真中各种节点、子网都是属于网络模型,网络模型校核的目的是保证开发者根据概念模型,选用合适的网元模型,建立正确的网络描述。在战术通信仿真系统中首先要精确描述节点模型,如信息交换节点、指挥车节点、战斗车节点的组成关系,这需要和 M&S 用户讨论确认,在战术通信系统中节点种类繁多,必须对每一种节点模型进行校核。这部分的工作量非常大,如果在实际应用中,某类节点发生变化,必须重新修正该类节点模型,只有节点模型正确了,由节点模型组成的网络模型才能够准确模拟实际网络。对网络模型的校验可采用审核、检查、评审等非形式化的方法。

5. 实现的校核与验证

在完成仿真模型的设计之后,需要对概念模型的软件编码和硬件环境的构造进行详细设计,主要工作是基于概念模型基础上产生仿真行为的组件、元素和功能函数,确定它们的特定表达形式等。实现的校核主要工作过程是检查一些规范和功能上的设计方

案, 这些规范和方案定义组成了 M&S 的性能需求、软件、硬件环境。通过对实现的校核, 保证所有定义的特性、功能、行为、算法和交互作用都能够被正确、完整、保持一致地反映在设计过程中。为了保证设计过程确能反映 M&S 需求, 满足确认过程的可接受性标准, 在对功能设计过程进行校核时, 要考虑到已被验证的概念模型所提供的各类信息, 并对最后的模型或仿真结果进行正规的评审。评审的方法主要是在相同的输入条件下, 将仿真模型或结果与真实世界或预期的行为进行比较, 分析差异对预期应用需求的影响有多大, 确定是否达到了逼真度的要求。

在战术通信仿真系统中, 首先要确定各种设备的输入参数与真实世界保持一致, 如确定无线电台设备的信息速率、频率、发射功率等关键参数, 路由设备的参数设置, 如路由开始时间, Hello 报文发送频率, Update 报文发送频率等, 再通过运行仿真, 对统计结果分析校核。对于某些功能的校核可以通过仿真统计结果进行比对分析, 达到校核验证的目的, 如观测发送队列的统计结果, 确定是否按照功能设计的要求发送报文, 是否有报文不能及时发送的情况; 有的只能通过代码走查、调试跟踪等方式才能够实现校核, 如 TDMA 协议中时隙的划分、分配等。

6. 应用的校核与验证

在仿真准备运行之前, 还需要对应用的相关环节进行校核与验证, 还包括一些辅助性的工作, 如检查使用的软硬件平台是否合适等。对于人在回路仿真系统来说, 还要检查操作员是否经过了必要的训练。

战术通信系统的应用非常灵活, 而且有的应用具有前瞻性, 这些都会增大应用的校核、验证的难度。战术通信仿真系统的应用设计主要分为以下四个部分:

(1) 网络拓扑设计

确定仿真网络的地域覆盖范围, 如战术通信系统内的每个子网, 如师网络、团网络、营网络等, 它们所覆盖的大致范围; 在无线通信环境中, 节点距离对通信性能的影响非常大, 确定网络覆盖范围, 才能正确模拟无线组网、无线通信的情况; 确定子网内的节点组网关系, 节点间通过有线或无线通信方式实现组网, 在战术通信系统中存在多种无线通信手段, 同一节点可能同时包含多种电台设备, 通过电台参数的设置来实现节点间的组网, 必须保证同一个无线电台网的节点个数以及节点的组成与真实情况一致; 确定子网间的连接关系, 战术通信系统各个子网是互连互通的, 为了保证通信质量和抗损毁能力, 子网间可能存在多种连通方式, 必须与真实情况一致。由于战术通信系统节点数量巨大, 网络拓扑复杂, 因此这部分的校核需要花费大量的时间和人力, 校核的方法主要是采用人工检查审核等非形式化的方法。

(2) 网络流量设计

网络流量一部份是路由产生的, 通过设定路由协议和路由参数, 可以实现对路由流量的模拟; 一部分是节点间业务通信产生的, 通过对业务设置实现对业务流量的模拟。

对网络流量的校核验证的重点是业务流量的校核验证, 由于目前处在和平时期, 我军没有这部分真实数据, 只能参考国外, 如美军作战时的业务参数, 再结合我军设备的自身特点, 总结出作战时的业务流量特性, 因此这一部分的仿真具有一定的前瞻性。在战术通信系统中, 业务流量的情况与作战状态也有一定的关系, 作战过程可以大致分为作战前、作战中、作战后三个阶段, 在各个阶段业务的特性也有所改变, 在校核时也必须确定是对哪一阶段的仿真, 从而确定业务分布是否达到要求。

(3) 战场应用的设计

首先, 确定战术通信系统的位置, 由于地形对无线信道的影响非常大, 同样的仿真网络, 设置在平原、丘陵、山地, 它的仿真结果就大不相同, 因此必须在仿真中导入该区域的地形参数, 确保仿真结果的正确性。其次, 战术通信系统是一个动态的系统, 它的动态主要体现在节点运动、节点损毁, 以及无线信道受干扰三个方面, 在仿真时也需要把这些特点体现出来。节点运动的特性通过设计移动轨迹, 设置节点或子网的移动轨迹参数来模拟, 移动轨迹的主要参数是移动方向、移动速度、移动时间, 这必须与真实情况一致。在战术通信系统实际应用中, 某些节点可能因为故障暂时失效, 在一段时间之后重新恢复功能, 或者在作战过程中被敌方击毁, 这些情况可以通过设置节点的损毁参数来实现, 损毁参数主要包括故障产生时间、故障恢复时间。在实际作战中, 敌方可能会对我军的无线信道进行干扰, 通过设置无线干扰节点, 来模拟信道干扰, 干扰节点的位置应和作战想定保持一致。

(4) 联邦设计

战术通信系统网络规模较大, 用单机仿真难以模拟整个系统, 需要进行分布式仿真, 分布式仿真的重点是确定联邦的划分, 联邦成员必须相对独立, 联邦间交互的信息相对较少, 这在 4.3 节中有详细的阐述。

7. 评估可接受性

评估仿真系统的可接受性, 需要对确认系统的仿真结果: 即从功能、指标、动作行为以及仿真系统的精度和交互能力上验证结果是否满足应用目标的需求。

在以上已经进行的 V&V 工作的每一个阶段, 都应形成一个阶段性的 V&V 报告, 在进行评估可接受性时, 将所有的阶段性报告汇总成一个综合性的 V&V 报告, 这是评估可接受性的重要依据。在可接受性评估完成后, 应提交可接受性评估报告, 对评估情况进行总结, 并对仿真是否进行确认提出建议。

8. 确认

在可接受性评估结束后, 由确认代理和 M&S 用户对所提交的可接受性评估报告进行复审, 并综合考虑 V&V 结果、M&S 的开发和使用记录、M&S 运行环境要求、配置管理和文档情况以及 M&S 中已知存在的局限和不足之处, 最终做出对 M&S 是否可用的

结论，向用户提交确认报告。

5.4.3 形成文档

在战术通信仿真系统中进行 VV&A 工作，不但可以增强 M&S 用户对建模与仿真的信心，而且也为战术通信仿真系统未来的应用提供了良好的基础。因为校核与验证工作是仿真系统的设计、开发、测试、应用的全过程紧密结合的工作，每一个过程都有详细的计划和记录，可以保留大量的有用数据资料，为战术通信仿真系统的未来应用和再次开发提供有效的历史文档和数据支持。

在这里对 VV&A 过程中形成的文档进行了归纳总结，并对每个文档需要重点强调的关键内容进行了梳理。

在 M&S 开发全过程中，VV&A 形成的相关文档主要包括：V&V 计划、VV&A 阶段报告、V&V 报告和确认报告等。

1. V&V 计划

战术通信仿真系统的 V&V 计划必须覆盖这个仿真系统的全生命周期，全面考虑仿真系统的应用目标、历史情况、开发团队、经费预算等各方面因素，这样能够降低开发的风险，它的主要内容包括：

(1) 由仿真系统应用目标所确定的可信度评估目标和系统可接受指标

根据用户需求、仿真系统开发计划和仿真系统应用目标确定 VV&A 工作的主要目标和要达到的指标，需要详细说明建模仿真的需求和可接受准则，分析仿真过程中的限制和存在的风险，提出系统可信度评估目标等。

(2) VV&A 过程工作流和信息流模型

这一部分主要描述 VV&A 过程的工作流，并且指出在相应工作阶段应该提供的文档信息、数据信息，在工作结束时形成的文档信息等，形成信息流模型。VV&A 过程的工作流与 VV&A 执行过程基本一致，是按照概念模型校核与验证、设计的校核与验证、实现的校核与验证、应用的校核与验证、评估、确认的步骤进行的。

表 5-3 对战术通信仿真系统的 VV&A 过程工作流和信息流做了一个粗略的总结，可以根据系统开发的具体情况进行增减和完善。

表 5-3 VV&A 工作流和信息流

编号	VV&A 过程	需要的信息	形成的信息	备注
1	概念模型校核与验证	用户需求说明书 需求规格说明书 仿真系统概念模型设计书	V&V 阶段报告	主要应用非正规方法进行校核与验证
2	设计的校核与验证	仿真系统详细设计书 真实设备、节点等的相关资料	V&V 阶段报告	主要应用非正规方法、静态方法进行校核与验证
3	实现的校核与验证	各个模型的具体代码 真实设备、节点等的相关资料	V&V 阶段报告	主要应用动态方法、静态方法进行校核与验证
4	应用的校核与验证	仿真试验报告 仿真试验数据 真实世界的试验数据	V&V 阶段报告	主要应用非正规方法、静态方法进行校核与验证
5	评估	用户需求说明书 仿真系统设计书 仿真系统的技术状态管理、文档情况 V&V 报告	评估结果	这里的 V&V 报告, 是根据前几个阶段的 V&V 阶段报告总结而成的
6	确认	用户需求说明书 评估结果	确认报告	

(3) 仿真系统可信度指标定义和度量框架

在这一部分要确定需要对具体的模型制定可信度评估的指标, 详细描述它们的定义, 并确定可信度的度量。确定可信度的度量需要根据实际设备和应用的情况、用户需求、开发能力、仿真局限性等综合考虑, 保证制定的可信度量具有可执行性。

对战术通信仿真系统这种复杂的大系统, 可信度的制定是分层、逐级进行的, 一般按照由下而上的顺序进行, 底层的基本模型的可信度制定相对简单, 它的可信度指标要求较高, 有时必须要求逼真度达到 1 的要求; 对由基本模型组成的上层模型, 由于组成复杂, 存在误差累计的因素, 因此它的可信度指标相对低一些。可信度的确定非常重要, 它是指导后续 VV&A 工作的重要指标, 因此要慎重考虑, 具体可信度量还需要综合各种情况, 反复讨论决定。

(4) VV&A 团队的组成和分工

在战术通信仿真的 VV&A 中, VV&A 团队分为三类: M&S 用户、M&S 开发者和 VV&A 代理, 通过表格分别罗列出这三类的单位、组织或机构, 还需要描述各自负责的主要工作, 并且确定每一类别的负责人, 便于工作开展时的交流及配合。其中 M&S 用户是 M&S 的发起方和 M&S 的使用者, 主要负责参加确认计划的制定和确认决策的形

成；M&S 开发者是负责开发或修改仿真的个人、组织或机构，负责辅助 VV&A 代理的工作，提供相应的支持；VV&A 代理由 M&S 用户指定的，负责对 M&S 进行 VV&A 工作的个人、组织或机构，主要负责校核与验证工作，并将收集整理的结果，评估 M&S 的可接受性。

(5) 仿真系统 VV&A 所需的资源

这一部分内容主要确定执行仿真系统 VV&A 工作所需要的硬件资源、软件资源、场地资源、开发进度和经费预算等，可以通过表格的形式罗列出来。

在硬件资源的表格内需要详细记录所需硬件的数量及性能。硬件资源主要包括执行仿真工作的计算机，存储 V&V 数据的服务器，在分布式半实物仿真系统中还包括搭建试验环境所需要的设备，以及进行半实物仿真试验的真实设备等。在经费许可的情况下，所需资源的数量和性能参数需要和仿真系统的要求匹配，并具有一定的可持续性，达到支持后续开发的目的。

在软件资源的表格内需要记录所需软件的名称、厂家、用途等。软件资源主要包括仿真开发平台，进行 V&V 工作的专用软件，存储 V&V 数据的数据库，以及进行分布式仿真的 HLA 平台。在选择 V&V 工作的专用软件时，尽可能地使用成熟商用工具和有效的集成系统，能够降低仿真系统 VV&A 工具开发的成本，保证开发质量和效率。

场地资源在复杂的大型仿真系统中尤为重要，在战术通信仿真系统中采用了分布式半实物的仿真方式，仿真试验环境复杂，仿真试验需要的空间较大。为了利于仿真试验的开展，避免反复更换试验场地而消耗的人力、物力和时间，应在最初就确定好相对固定的场地，保证仿真工作顺利进行。

开发进度应该与战术通信仿真系统的开发进度相匹配，将时间点具体到 VV&A 的每个执行过程中，清晰明确的时间安排，有利于 M&S 开发人员和 VV&A 代理开展工作，保证每个阶段任务的完成时间，从而保证整个仿真系统的完成时间。

经费预算包括 VV&A 人员的工资，专用软件购置费，固定资产使用费，管理费，材料费，试验费，各类办公用品、资料复印等费用，专家咨询费等。

严格按要求制定 V&V 计划，能够尽早发现战术通信仿真系统设计和开发中存在的问题，及时纠正错误，提高仿真系统可信度；并能够细化仿真系统的开发流程，保证仿真系统按计划实施。

2. V&V 阶段报告

V&V 阶段报告没有具体的格式要求，它是各个 VV&A 阶段产生的非正式的报告，主要记录任务开展时间，参与人员；各个阶段校核和验证的具体过程和内容，需要记录发现的问题，对应的解决办法，以及解决问题后的校核验证工作；纪录 V&V 工作中提出的建议；整理 V&V 数据等。

V&V 阶段报告十分重要，是对各个阶段的 VV&A 工作的总结，最终的 V&V 报告

也是由这些阶段报告整理而成的。严格记录 V&V 阶段报告, 能够使 V&V 报告内容更完整、更充实、更准确。

3. V&V 报告

V&V 报告需要综合各个阶段的 V&V 阶段报告, 结合 VV&A 计划, 整理出完整的 V&V 报告, 它主要包括以下几个部分:

(1) 当前状态

这里主要对项目研发背景做一个说明, 介绍仿真系统的应用模式和需求, 描述影响 M&S 开发、VV&A 工作的相关因素。主要从以下四个方面介绍:

- M&S 假设;
- M&S 能力;
- M&S 局限性;
- M&S 风险预计。

(2) M&S 需求与可接受指标的关系

在这里主要阐述战术通信仿真的用户需求, 并指出如何评估仿真系统达到了用户的需求, 可以采用表格的方式表示出用户需求与可接受性指标的对应关系。这些内容与 VV&A 计划中第一部分(由仿真系统应用目标所确定的可信度评估目标和系统可接受指标)基本一致, 由于目前仿真系统基本开发完成, 因此这部分内容更完善清晰, 可能对 VV&A 计划中的部分指标有所修正。

这里需要把所有指标罗列出来, 便于确认代理开展评估和确认工作。

(3) V&V 任务

这一部分是 V&V 报告的重点内容, 对所有执行过 V&V 任务按照一定的规律, 分别列出来。下面是战术通信仿真系统的 V&V 任务的执行情况。

① 设备模型的 V&V

首先确定建立模型的数量、类型与实际情况是否一致, 在真实世界中很多设备可以用同样的模型替代, 这种替代是否可行; 然后对设备模型的具体设计实现和功能的 V&V 进行梳理, 主要从数据校核和功能校核两部分进行, 最后通过表格对校核的内容和过程、结论作出总结, 如表 5-4 所示。在表 5-4 中列出设备所需要进行的数据校核项目、功能校核项目的总的情况, 每一个设备都有一个单独的表格进行描述, 其中“子项目 ID 号”是唯一的编号, 它的编号规则如表 5-5 所示, 在表格内需要对子项目的名称和内容进行粗略的描述, 便于 VV&A 人员了解总的 V&V 过程, 避免某些项目的遗漏。表 5-4 与表 5-5 存在对应关系, 在表 5-4 中的每一个 V&V 项目都对应一张表 5-5 格式的校核表; 表 5-5 中的“V&V 子项目 ID”与表 5-4 中的“子项目 ID 号”是一一对应关系, 在表 5-5 中详细说明测试目的、测试条件或环境、测试方法、测试过程, 最后说明测试的准则, 并对测试结果作出结论。

表 5-4 XX 设备数据/功能校核项目列表

V&V 项目	XX 设备数据/功能校核	
V&V 子项目 1	子项目 ID 号	V_设备_DATA/FUNCTION_1
	子项目名称	
	子项目描述	
V&V 子项目 2	子项目 ID 号	V_设备_DATA/FUNCTION_2
	子项目名称	
	子项目描述	

表 5-5 V_设备_DATA/FUNCTION_1 校核表

V&V 子项目 ID		V_设备_DATA/FUNCTION_1
V&V 子项目名称		
测试目的		
测试条件或环境		
测试方法		
测试过程		
测试结果说明	准则	
	结果	

② 节点模型的 V&V

节点模型的校核相对简单，主要是对网络节点模型的种类及内部设备组成情况进行校核，节点的内部组成的校核主要从设备组成的数量和类型、设备之间的连接关系和方式、对外的接口方式这三方面进行校核，校核主要采用静态的比对方法。

③ 网络模型的 V&V

在战术通信仿真中的网络模型非常多，也需要用表格的方式才能清晰的描述，它的表达方式和设备模型的校核方式基本一致，可以继续沿用表 5-4 与表 5-5 的表格框架，从节点组成可以分为不同级别的网络，如干线网、师级网、团级网、营级网、师团网等；从通信方式可以分为有线网、高速电台网、短波电台网、超短波电台网、卫星组网等；从使用功能上可以分为指挥所网、情报网等，根据具体情况进行校核。校核内容包括节点类型、节点个数、节点间的组织关系、电台的参数配置、节点的 IP 地址的分配、网络环境配置等，校核方式主要采用了静态比对的方法。

④ 仿真结果的 V&V

这一部分的校核较为复杂，是对基于基本仿真模型的系统模型的校核，仿真结果校核里，包括对仿真系统的各种能力进行校核，如路由组网能力、业务通信能力、移动组

网能力、抗毁抗干扰能力等，这些能力是需要在由各种基本仿真模型组成的大的仿真网络场景中，运行仿真，统计结果，通过分析比对才能校核。在 V&V 报告里，需要为 VV&A 人员提供对应试验的场景信息，包括网络的基本组成，网络的组网说明，网络场景设置，业务流量设置等关键内容。最后的校核需要将仿真结果与真实试验的结果相对比，在前面已经说过基本模型的逼真度较高，系统模型由于误差累计，逼真度降低，此时对比会发现数据可能没有完全相同，只是在大致的范围内波动，这些都需要 VV&A 人员对其可信度进行评估；对于某些仿真结果，没有真实的试验数据，不能够通过单一的比对，或者数据处理的数学方法来评估结果，需要 VV&A 人员的工作经验或其他非正规的方法进行评估，或在将来的使用中逐步完善这部分的内容。

(4) V&V 建议

通过对整个 V&V 的分析，VV&A 人员对整个仿真项目会有更深入的了解，根据实际 V&V 过程中的问题，对仿真系统的开发、V&V 的执行、M&S 用户提出建议。

(5) 实际 V&V 资源

这一部分主要描述项目开发完成后，实际的资源消耗的情况。在 VV&A 计划中也预先对 V&V 资源有一个详细的分配，但实际情况肯定会与计划有所差别，在这里重新总结，可以对比得出预先计划的不足，并且可以分析实际消耗的资源是否符合开发要求，为以后新的项目开发总结经验，提供参考资料等。需要包含的主要内容如下：

- V&V 计划的任务分配；
- V&V 时间安排；
- 主要参与人员：包括 V&V 人员、确认人员、其他参与人员。

这里面很多内容在各阶段的 V&V 报告中都有记录，可以从中总结而来。

(6) V&V 经验

在项目开发完成后，开发人员都会有一些新的体会，对战术通信仿真这样的大系统，更是会遇到很多其他项目没有的新问题、新情况，并形成了一套行之有效的解决办法，这些都是宝贵的开发经验，在这里就需要把它们记录总结下来，为以后的开发人员和开发项目提供有益的参考。

4. 确认报告

确认报告是 M&S 用户通过 V&V 报告，结合仿真需求、应用和 VV&A 计划，得出的一个综合性结论。一个最终的确认结论可能是以下一种或几种结论的组合：

- M&S 对于其预期应用是完全可用的；
- M&S 对于其预期应用是可用的，但应注意有关的限制和约束条件；
- M&S 在使用之前应当进行修改；
- M&S 需要进行附加的校核和验证工作；
- M&S 对于预期应用不具有可用性。

在这些结论中，可以认为前两种是符合要求的结论，后三种是不符合要求的结论。其中最后一种结论是最严重的，它表示 M&S 的开发是完全失败的，需要重新开发一个 M&S，或者采用替代的 M&S 来解决问题。

通过对 VV&A 过程中各种文档的详细内容的讲解，说明仿真系统的 VV&A 实施过程，必须产生相应的文档记录，确保 VV&A 的良好的计划可以提高仿真系统正确性和仿真结果的可信度，通过优化安排其实施过程，能够最大限度地发现问题，提高仿真系统质量，通过对每项工作结果的认真记录，为系统 VV&A 下一步工作和验收提供必要信息。

第6章 战术通信效能评估技术

随着作战空间从一维、二维、三维发展到海、陆、空、天、电五维一体化、通信体制的更新换代、硬件水平的迅速提升等,使得各种新型通信系统相继问世或处于研制之中。战术通信系统是军事通信系统最活跃的领域之一,但战术通信系统的能力需求如何确定、所设计或研制的战术通信系统具有多大的效能或对研制指标满足到哪种程度、相对其他战术通信系统的功能性能如何评价,需要一种科学客观的方法进行评估。因此,开发具有战术通信系统特点的系统效能评估方法是非常重要的,通过合适的效能评估方法和具有可比性的指标来定量与定性分析、评估敌方和我方的战术通信系统效能。

随着战术通信系统的复杂度越来越大,研制及试验的成本越来越高,如何提高系统效能、降低系统开发成本,也日益引起系统用户和研究人员的重视。在系统投入使用或扩充之前就知道它的性能和效能,设计者就有较大的自由度,避免在实现阶段和运行阶段再调整系统的参数而带来的难度和费用增减。在设计阶段,评估可以为有关决策部门确定系统方案提供科学依据,也可以为设计部门提供建设性的意见,为不同技术途径的选择提供合理的判决依据;在验收阶段可以提供有效的测试和评估手段,为进一步完善系统提供保障。因此,如果在论证阶段、设计阶段、验收阶段分别对系统进行综合的效能分析,则可以为方案优化、技术优化、试验验收方法设计等提供依据,不仅可以节省大量的人力和物力,而且能够起到事半功倍的作用。本章介绍战术通信效能评估的定义、原则、指标体系、评估算法以及评估系统的构建方法。

6.1 基本概念

6.1.1 一般术语

指标: 是评价目标的详细的具体的衡量标准,是衡量目标的单位或方法。

定性指标: 是指不能通过量化数值进行衡量,而只能用模糊语言(如很好、好、一般等)表达的指标。

定量指标: 是指可以通过量化数值进行衡量和表述的指标。

指标体系: 是指系统的,具有紧密联系的,能够反映评估对象的所有指标集合,并且具有不同的层次关系。

指标权重：是指某一指标在所有指标集中的重要程度，在评价体系中，指标权重是某一指标在所有指标集中的重要程度，它反映了各指标之间客观存在的不平衡性。

归一化：是将指标数值经算法处理后限制在一定数值范围内，归一化可以去除指标量纲，避免不同类型量纲给指标带来的影响，同时归一化可以消除指标数值太大或太小而带来的数值计算误差，为计算结果的准确性和可信度提供保障。

评估算法：是解决评估效能计算的方法，是按照一定规则解决效能评估问题的一系列有限步骤的运算。

6.1.2 系统效能

战术通信系统的效能，一般分成两类，即战术通信系统自身的效能和战术通信系统的作战效能。战术通信系统的自身效能反应系统本身所具有的能力，是系统静态效能的一种表现，也称之为系统效能。而战术通信系统的作战效能是在规定的作战环境条件下，由特定的人运用战术通信系统执行规定的作战任务时，所能达到预期目标的程度，是系统、人、环境综合作用的结果。显然，作战效能是在作战环境中才能体现，只有在战场中战术通信系统才能体现它的这种效能，是把战术通信系统视为战争的一个组成要素，就如把作战部队和武器系统视为战争的组成要素一样。

由于作战效能的研究要涉及很多非战术通信系统方面的内容（如作战部队、武器、操作人员、作战环境等），这里不进行研究，本章只对战术通信系统自身效能的研究。

目前，对系统效能的定义并没有统一的标准，不同的组织分别提出不同的定义，下面是几种关于武器系统效能的定义：

（1）美国航空无线电研究公司的定义：“在规定条件下使用系统时，系统在规定时间内满足作战要求的概率”。

（2）美国海军的定义：“系统能在规定条件下和规定时间内完成规定任务之程度的指标”或“系统在规定条件下和在规定时间内满足作战需求的概率”。

（3）美国麻省理工学院的学者在评价效能时的定义：“系统与使命的匹配程度”。

（4）美国工业界武器效能咨询委员会（WSEIAC）的定义：“系统效能是预期一个系统满足一组特定任务要求的程度的度量，是系统可用性、可信性和固有能力的函数”。

（5）我国军用标准《可靠性维修性保障性术语》中规定的系统效能是：系统在规定的条件下和规定的时间内，满足一组特定任务要求的程度。它与可用性、任务成功性和固有能力强有关。

这里将系统效能定义为：系统效能是系统是在规定的条件下达到特定任务要求的能力，是系统综合能力的静态表现。

6.1.3 评估要素

战术通信系统效能评估的基本要素包括：评估目标、评估原则、评估主体、评估对象和评估指标五个部分，评估目标是整个评估活动开展的原点，评估原则是评估过程科学性的重要保证，评估指标则是评估结果可信性的坚实基础。相对于以上要素，评估主体与评估对象则是评估活动过程中的实体要素，二者具有一定的能动性。

1. 评估目标

确定评估目标是整个评估过程的最初起点，实质上“效能评估”是一个信息收集、处理、计算以及管理的过程，是为特定目标的决策提供关于对象的客观的状态、属性、趋势等信息的过程。因此，评估目标需要评估需求方、评估活动执行方来共同决定，能够充分反映用户的需求，并直接决定后续的所有评估活动。评估目标的确定过程相当于用户需求分析，是需求方和设计方不断进行沟通交流的过程，是极其耗时和重要的步骤，也是十分关键的环节。

2. 评估原则

为了保证战术通信系统效能评估的顺利进行，需遵循以下两个原则。

(1) 科学性原则

科学性原则有两层含义，第一是指标体系的科学性，即评估指标必须能够反映战术通信系统的特点，并具有明确性、完备性、实用性、客观性等特性。第二是指评估模型的科学性，包括评估算法的选取、评估指标的建立、评估指标的处理、指标权重的确立等都需要进行科学的分析与论证，保证评估结果的科学有效。

(2) 客观性原则

评估是通过人的活动将系统客观存在的能力反映在人的意识之中，因此，评估过程是客观事实在人意识的反映过程，具有主观性。评估会因人、因时、因环境不同而有不同，所以评估过程中的差异性是无法排除的，只能尽量缩小。在评估过程中，要采用科学的方法或算法，尽最大可能地减弱或消除主观因素的影响，使评估结果可信。

3. 评估主体

评估主体是指参与评估活动的组织和人员，诸如使用方、设计方、实施方等，每一类评估主体都有自身特定的评估角度，都是不可替代的。在确定评估指标及建立评估指标体系时，要对所有评估主体细致调查，充分听取各评估主体的意见和建议，这样才能保证评估指标的完备。

4. 评估对象

评估对象即评估客体,单纯从“战术通信系统效能评估”这个概念来看,评估的对象就是“系统效能”。概括来说,战术通信系统效能是系统所具有的各种能力的综合表现,评价系统是否达到预期效果。战术通信系统效能评估是由明确评估目标、选取评估指标、构造指标体系、确定指标权重,建立评估算法、获取指标数值、进行数值计算与分析评估结果等诸多环节所组成的综合过程。

5. 评估指标

指标是衡量目标的单位或方法,是系统设计时规定的需要达到的目标,也可以理解为具体化的目标。在评估工作中,指标是指具有原则性、全面性、明确性、独立性等特征的评价目标。指标可进行逐级分解,如设定为一级指标、二级指标、三级指标等,上一级指标对下一级指标有涵盖性,下一级指标对上一级指标有隶属性,同级指标有清晰的区别性,使之最终成为具体的、可操作的细分目标。指标最终的表现形式有两种:定性指标和定量指标。

6.2 评估指标体系

6.2.1 指标选取原则

选取战术通信系统的度量指标,是建立评估指标体系的重要步骤,也是评估活动的关键环节。如何从错综复杂且数量众多的指标中选取合理的指标,直接关系到评估结果的可信程度。以下是战术通信系统度量指标选取的一些基本原则。

(1) 针对性:评估指标要紧密结合战术通信系统的特点、应用背景等,并能够真正反映战术通信系统的效能,决不能将与评估目的、评估对象无关的指标选进来。

(2) 明确性:评估指标要具有明确的含义,使系统分析、设计、研制等人员能准确理解,并能够真实客观地反映战术通信系统的特征。

(3) 完备性:抓住影响战术通信系统效能的最关键和最核心的指标因素,将筛选后的所有指标全放在指标集中,如果遗漏能够反映评估对象的指标,评估结果就会出偏差。

(4) 独立性:慎重区分相近和类似的指标,保持指标之间的相互独立,以免类似指标的重复计算,影响评估结果。

(5) 实用性:评估指标可获取能力强,应能够通过仿真、数学公式、测试仪器或试验统计等方法获得,易于操作和使用。

6.2.2 指标选取方法

在建立评估指标体系时，并不是指标越多越好，关键是要理清指标之间的关系以及指标对评估目标实现所起的作用。因为，如果选取的指标过多，则会分散主要指标因素对系统效能的贡献，如果选取的指标过少，则会忽略某些重要因素，两者都会影响最终的系统效能评估结果。因此，必须采用合理的方法，对众多指标进行分解或综合，选取最能反映系统优劣的指标，为评估目标实现提供基础。以下是指标选取的三种基本方法。

(1) 自顶向下法

自顶向下法是首先确定评估目的，并针对评估对象，分析系统所具有的功能与能力，然后再对功能与能力进行分解，可以分成不同的层次或级别，最终的末端指标是具体化的、可操作的指标。自顶向下的过程，是一个动态的、不断完善的过程，需要对指标进行不断对比分析，保证同一层次的指标具有相同的级别，并避免类似指标的重复出现。

(2) 调查法

调查法是最普通的方法，这种方法是先由评估主体中的某方拟定草案，如由设计方草拟评估指标，然后广泛征询使用方、实施方等多方的意见和建议，经反复修改确定。

(3) 试验法

试验法是首先根据评估目的，拟订指标草案，建立评估模型，在此基础上将试验、仿真、测试的指标数据输入到评估模型，将评估结果及试验结果进行对比分析后，对评估指标进行修改，最后确定指标及其相互关系。

6.2.3 指标体系设计原则

指标体系设计是评估活动中最为重要的环节，是指标数据处理的基础，直接影响到评估计算结果。在设计指标体系时，必须慎重考虑，并坚持以下几个原则。

(1) 科学性原则

科学性原则主要体现在设计评价指标体系时，首先要有科学的理论作指导以及指标之间的相互关系，有理论基础，同时又能反映评估对象的客观事实，不能够随意的构建指标体系。这样，能够针对评估目标，抓住评估对象的本质，使评估指标体系能够在基本概念和逻辑结构上严谨、合理。

(2) 系统优化原则

评估指标体系由很多指标构成，这些指标是互相关联和互相制约的，用于对评价对象的衡量。有的指标之间有横向联系，反映同一层次不同侧面的相互制约关系；有的指

标之间有纵向关系,反映不同层次某一侧面之间的相互包含关系。同时,同层次指标之间尽可能的界限分明,能够全面反映上层某一侧面的能力,并且避免相互有内在的关联关系,这样,指标体系可以体现出很强的系统性。在进行评估指标体系优化时要注意以下几点:

① 指标数量的多少及其体系的结构形式以系统优化为原则,即以较少的指标(数量较少,层次较少)较全面系统地反映评估对象的内容,既要避免指标体系过于繁多,又要避免指标过少过简,目标是评估指标体系的总体最优,能够全面反映评估对象。

② 评估指标体系要统筹兼顾各方面的关系,充分考虑各方面指标对评估对象的支撑,并且同层次指标之间存在相互制约关系。因此,在设计指标体系时,应该兼顾到各方面的指标。

③ 设计评估指标体系的方法应采用系统的方法,例如系统分解和层次结构分析法,由总指标分解成次级指标,再由次级指标分解成次次级指标(通常人们把这三个层次称为目标层、准则层和指标层),对指标进行逐次逐级分解,并组成树状结构的指标体系,使体系的各个要素及其结构都能满足系统优化要求。也就是说,通过各项指标之间的有机联系方式和合理的数量关系,体现出对上述各种关系的统筹兼顾,达到评估指标体系的整体功能最优,客观、全面地评估系统的输出结果。

(3) 实用性原则

实用性原则指的是可操作性和实用性。

① 简化指标。评估指标体系要精简有效,即评估指标体系不可设计得太庞杂繁琐,在能基本保证对评估对象进行客观性、全面性的评估情况下,指标体系尽可能简化,减少或去掉一些对评估结果影响甚微以及具有相同含义的指标。

② 指标数据易于获取。评估指标所需的数据易于采集,无论是定性评估指标还是定量评估指标,必须是可测量的、可评判的,即数据可以通过仿真、试验、专家打分等手段方便获得,并且数据来源必须可靠且容易取得。否则,评估结果的可信度将大大降低。

(4) 结果导向原则

评估目的不是单纯评出名次及优劣的程度,更重要的是引导和鼓励被评估对象向正确的方向和目标发展。战术通信系统效能评估的目标是为系统论证、方案设计、系统研制、系统优化与实际应用提供依据和建议,保障系统生命周期的可行性、科学性、经济性和应用合理性。

6.2.4 评估指标体系建立

层次分析法(Antalytic Hierarchy Process,简称 AHP 法或层次分析法)是美国运筹学家沙旦(T.L.Saaty)于 20 世纪 70 年代提出的,是一种定性分析与定量分析相结合的多目标

决策方法。在层次分析法中，面对复杂的决策问题，首先采取的处理方法是：对问题所涉及的因素进行分类，然后构造一个各因素之间相互联系的层次结构模型，并将关联因素分为：目标类、准则类和指标类。

因此，在构建战术通信系统效能评估指标体系时，可以借鉴层次分析法的思想，将评估体系设计为相互关联的层级结构，然后在指标选取原则和指标体系设计原则下，利用自顶向下法和调查法两种指标选取方法相配合的方法，最终完成战术通信系统效能评估指标体系的构造。

战术通信系统效能评估的典型指标体系如图 6.1 所示，分为三个层次：目标类、准则类和指标类。目标类是战术通信系统效能，也是战术通信系统评估活动的评估对象，是最终目标。准则类分为：基本通信能力、系统机动力、系统抗毁能力、系统抗扰能力、网络管理能力、安全保密能力、环境适应能力、可靠性、可用性、完成性、维修性共 11 项，分别用于描述战术通信系统在不同方面所具有的能力。指标类是对准则类的一些细化指标。在此指标体系中下一层输出是上一层输入，因此可根据需要进行纵向和横向的延伸和扩展。

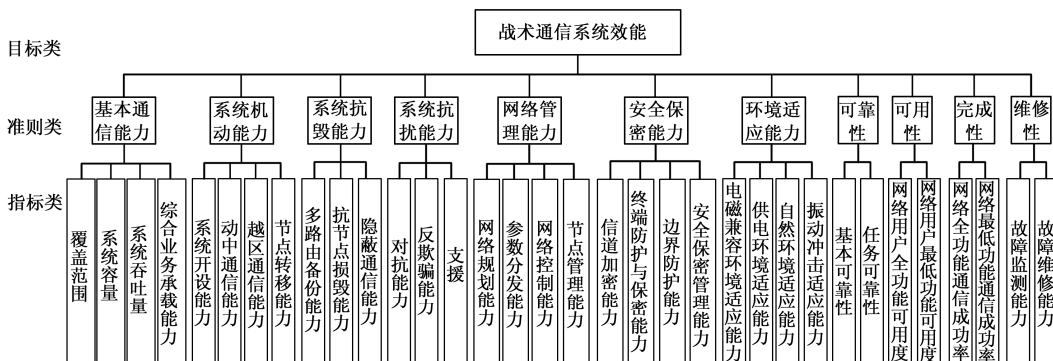


图 6.1 战术通信系统评估指标体系

指标类中各指标的细化如下所示：

(1) 基本通信能力

基本通信能力是战术通信系统所有功能实现的基础，是完成作战任务的通信保障，是系统最重要的指标之一，可分为覆盖范围、系统容量、系统吞吐量、综合业务承载能力等几种。

- 覆盖范围：指系统所能覆盖的地域范围；
- 系统容量：指系统所能支持的用户数量；
- 系统吞吐量：指单位时间内系统成功传输的无差错的业务数据量，体现了系统的通信能力，是通信系统的一个统计特征；
- 综合业务承载能力：指系统对数据业务和语音业务的支持承载能力，如图 6.2 所示。

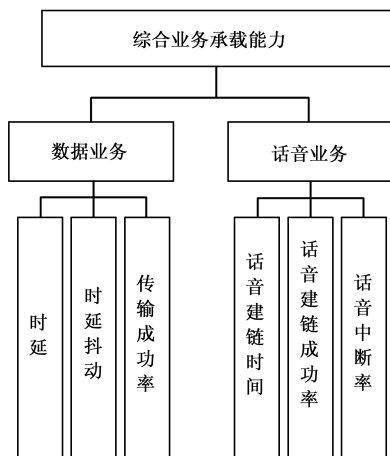


图 6.2 综合业务承载能力

时延：指业务从发送到接收完成之间的时间。

时延抖动：指时延时间的变化量。由于系统承载的业务类型不同，提供的服务也有所差异，对性能指标的要求也有所不同。

传输成功率：指成功接收的数据包占发送的全部数据包的比例。

话音建链时间：指从摘机拨号到成功接收到应答铃声的时间。

话音建链成功率：指每次呼叫成功的次数占全部呼叫的比例。

话音中断率：指通话过程中，话音中断且不能继续通话的次数占全部通话次数的比例。

（2）系统机动能力

系统机动能力指战术通信系统为运动节点提供通信保障的能力，包括系统开设能力、动中通信能力、越区通信能力、节点转移能力。

① 系统开设能力：反映系统的快速开设能力，包括单设备开通时间、单节点开通时间和系统开通时间。

② 动中通信能力：指系统能够为机动部队提供不间断通信保障的能力。

③ 越区通信能力：指系统能够为机动节点在不同区域内移动提供不间断通信保障能力。

④ 节点转移能力：指系统中重要通信节点在位置转移后，能够重新组网通信的能力。

（3）系统抗毁能力

系统抗毁能力分为两个方面：一是指战术通信系统本身具备隐蔽通信的特点，能够避免受到攻击以致毁伤；另一方面是指战术通信系统遭到破坏后仍能够保障基本通信功能的能力。因此，系统抗毁能力包括多路由备份能力、抗节点损毁能力和隐蔽通信能力等：

① 多路由备份能力：指系统中重要节点具有链路冗余备份能力，在链路受到破坏的情况下，仍能够通过备份链路保持通信。

② 抗节点损毁能力：指系统中的节点在毁伤的情况下，整个系统仍能力重组，保持正常通信的能力。

③ 隐蔽通信能力：指系统具有隐蔽通信，不易被敌人侦听以致破坏的能力。

(4) 系统抗扰能力

这里所说的干扰，是指人为的、有目的的对战术通信系统设施实施的干扰，这种干扰的影响一般是通过对网中无线信道的干扰来实现的。例如：短波通信网络、超短波通信网络、分组无线电通信网络、野战综合通信网络等。对通信网络抗干扰性，目前在学术界和工程应用中还没有统一的认识。针对军用通信的特点，抗干扰的准则可表述为：通信系统的性能好到一定程度时，使干扰源付出最大的系统，应是抗干扰性能最好的系统。从保障战术通信系统正常通信的角度，我们把通信网络的抗干扰性分为：对抗能力、反欺骗能力和电子支援能力。

① 对抗能力：反映了通信网络具备的电子对抗能力，主要包括处理增益和干扰容限、多址方式和多址能力、同步坚固性、频谱利用率等指标。

② 反欺骗能力：主要包括对混入网内信息的识别能力、对敌网假信息的识别能力、同步隐蔽性、功率隐蔽性、设备隐蔽性等指标。

③ 电子支援能力：包括信息可检测性、保密性、示假能力、截获概率等指标。

(5) 网络管理能力

网络管理能力指战术通信系统对整个系统的网络设备、节点、性能的管理、控制、配置等能力，反映网络管理者对战术通信系统的驾驭能力，网络管理能力的好与坏直接影响到系统效能的发挥，因此也是系统的一项重要指标。

- 网络规划能力：指战术通信系统对整个系统的资源管理、规划以及规划结果生成与性能评估能力。
- 参数分发能力：指战术通信系统对规划结果的分发、销毁能力。
- 网络控制能力：指战术通信系统对整个网络、业务、用户的监视、管理以及调整能力。
- 节点管理能力：指战术通信系统对网络节点的控制管理能力，包括参数分发、状态监控与管理、性能分析与汇报以及用户权限管理等。

(6) 安全保密能力

安全保密能力是指战术通信系统的网络安全防护能力和通信保密能力，包括信道加密能力、终端安全防护与保密能力、边界防护能力、安全保密管理能力等。

- 信道加密能力：反映战术通信系统对不同传输信道的加密能力，包括超短波信道加密、高速数据信道加密、干线群路信道加密等。
- 终端安全防护与保密能力：反映战术通信系统对不同通信终端的安全防护和保

密能力,包括数据终端、话音终端等。

- 边界防护能力:反映战术通信系统的入侵检测和访问控制能力。
- 安全保密管理能力:反映战术通信系统的安全和保密管理措施。

(7) 环境适应能力

环境适应能力是指战术通信系统对物理的自然环境、供电环境、电磁兼容环境、振动冲击环境的适应能力,主要包含以下几个能力:

- 电磁兼容环境适应能力:指系统设备进行了电磁兼容设计,符合电磁兼容性规定,包括节点管理设备、短波电台、超短波电台、高速数据电台、远传互连线、卫星设备。
- 供电环境适应能力:反映战术通信系统的供电设计,以及对各种供电方式的适应能力。
- 自然环境适应能力:反映战术通信系统对各种自然环境的适应能力。
- 振动冲击环境适应能力:反映战术通信系统对各种振动冲击环境的适应能力。

(8) 可靠性

可靠性是指战术通信系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力,影响可靠性的因素以及可靠性的表现形式有多种。主要包含基本可靠性和任务可靠性。

① 基本可靠性

通信系统的基本可靠性涉及网络级、网络部件级和设备级,它们都直接反映了维修人力费用和保障费用的目标,主要包括:

- 平均故障间隔时间 MTBF (Mean Time Between Failure) 指可修复装备的一种基本参数。装备总寿命(工作时间)与故障装备总数之比。通常意义上指是评估设备相邻两次故障之间的平均工作时间。通常以“小时”为单位。关于 MTBF 值的计算方法,目前最通用的权威性标准是 MIL-HDBK-217 和 GJB/Z299B^[17]。其中 MIL-HDBK-217 是由美国国防部可靠性分析中心及 Rome 实验室提出并成为行业标准,专门用于军工产品 MTBF 值计算,GJB/Z299B 是我国军用标准。
- 故障率 λ 指装备的故障总数与装备的总寿命单位(工作时间)之比。通常定义为:已工作到时刻 t 尚未失效的产品,在时刻 t 后单位时间内发生失效的概率,称为该产品在时刻 t 的失效概率,检查失效率,记为 $\lambda(t)$ 。在单位时间 t 内,产品故障率与平均故障间隔时间呈倒数关系,即: $MTBF = \frac{1}{\lambda(t)}$ 。
- 平均维修间隔时间 MTBM
- 基本可靠度 R_0 指反映目标(如通信网络、网络部件、网络设备)无故障的概率。是指产品在规定的条件下,在规定的时间内,产品完成规定功能的概率。它是时间的函数,记作 $R(t)$,也称为可靠度函数。

$$R(t) = p(T > t)$$

式中： T 为产品寿命， t 为规定时间。

② 任务可靠性

通信网任务可靠性直接反映任务成功的目标，是针对网络级的可靠性使用参数。任务可靠性是指网络在规定的任务期间完成规定任务的概率。一般通信网只是提供通信的平台，要求在较长的时间内均可用，所以，随着时间的增加，网络部件必然发生故障，可靠度随之很快下降，必须进行维修。因此，除非有特殊要求，通信网一般不采用任务可靠性。一次通信的任务可靠性是指网络节点之间或某两个用户之间在一次通信时间内的可靠性。对所关心的极其重要的一次通信任务，该项参数及指标是有意义的。

(9) 可用性

反映战术通信系统完成规定功能时的处于可工作状态的程度，分为网络用户全功能可用度、网络用户最低功能可用度。可用性的指标是可用度，即网络在某时刻或任意时刻的连通概率，一般讨论稳态下的情况，此时任意时刻的连通概率相等，为稳态连通概率，即稳态可用度。通信网络的可用性给出了网络部件故障状态和维修情况下的网络可靠性指标。

(10) 完成性

通信网络的完成性给出了网络部件故障模式与网络引起通信业务性能（吞吐量和时延）下降时的网络可靠性。即完成性是考虑到通信网业务性能依赖于网络中各个节点的处理能力和各条链路的传输能力、网络部件的故障将使通信业务量下降的一类指标。简言之，就是将网络可靠性和业务性能合在一起考虑的指标。

反映战术通信系统完成规定功能的能力，分为网络全功能通信成功率、网络最低功能通信成功率。

(11) 维修性

通信网络的维修性指在规定使用条件下使用的产品，在规定条件下并按规定的程序和手段实施维修时，保持或恢复能执行规定功能状态的能力。

6.3 评估模型

6.3.1 指标处理

在对仿真结果或实测数据进行评估计算之前，通常要对各种数据进行统计处理，通常会采用如下几种处理方式。

(1) 原值

原值是将统计计算出的原始数据不做任何处理直接显示，因此这里就不涉及计算

方法。由于全网不同类型的业务信息端到端传输时延、全网不同类型的业务信息端到端传输时延抖动是点序列，可以显示出图形曲线。而全网不同类型的业务信息端到端传输成功率、全网业务吞吐量只是一个单值，显示相对简单，只能显示一个值，没有曲线。业务信息端到端传输时延、全网不同类型的业务信息端到端传输时延抖动的显示曲线如图 6.3 所示，图中横轴表示统计时间，纵轴表示统计指标，单位是毫秒，点表示统计值。

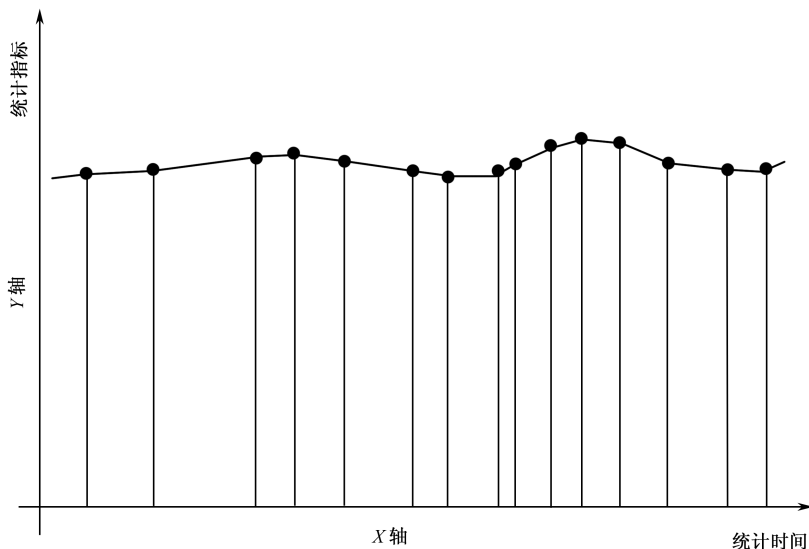


图 6.3 统计曲线

(2) 均值

只有全网不同类型的业务信息端到端传输时延、全网不同类型的业务信息端到端传输时延抖动进行均值处理，均值处理后也只有一个单值，显示也比较简单。设 X 是一次测试后端到端传输时延或端到端传输时延抖动得到的样本， x_1, x_2, \dots, x_n 是每个端到端传输时延或端到端传输时延抖动的样本数值，均值计算步骤如下。

第一步：求样本平均值和样本方差

样本平均值 \bar{x} ：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

样本方差 s^2 ：

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

第二步：剔除无效数据

在网络状态稳定时，传输时延或传输时延抖动也相对稳定，其数值应该在均值左右

分布, 因此可以使用正态分布来描述传输时延或传输时延抖动的变化。为了保证计算结果的真实性, 需剔除一些因突发因素引起的传输时延或传输时延抖动的巨大变化, 避免计算结果失真。同时, 根据正态分布的“ 3σ 规则”, 即:

$$P\{\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma\} = 0.9974 \quad (6-1)$$

得出, 传输时延或传输时延抖动的样本数值落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内几乎是肯定的。

式 (6-1) 中, μ 和 σ 分别是正态分布的数学期望和均方差。

这样, μ 对应样本平均值 \bar{x} , σ 对应样本方差的均方值 \sqrt{s} , 按照“ 3σ 规则”对传输时延或传输时延抖动的样本数值进行过滤, 剔除区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 以外的样本数值, 重新得出样本数值序列 y_1, y_2, \dots, y_m 。

第三步: 计算均值

全网不同类型的业务信息端到端传输时延或全网不同类型的业务信息端到端传输时延抖动的均值 \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (6-2)$$

(3) 均方值

同样, 只有全网不同类型的业务信息端到端传输时延、全网不同类型的业务信息端到端传输时延抖动进行均方值处理, 其显示和均值一样。均方值计算的样本数值序列为 y_1, y_2, \dots, y_m , 均方值 S 为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (6-3)$$

6.3.2 指标量化

评估指标归一化是在确定评估指标体系的基础上, 以及指标种类不同对整个指标体系中的最下层指标进行归一化。指标归一化的主要目的是: 将指标数值归一到区间 $[0, 1]$, 避免因为指标数值大小的差异以及量纲不同, 引起计算结果的失真。

根据不同指标种类: 功能指标 (定性指标) 和性能指标 (定量指标), 可以将指标归一化分为两种类型: 归一化函数和定性指标量化表。

1. 归一化函数

测试过程中, 仿真系统负责采集基于仿真时间的离散统计值。测试完成后, 仿真系统将仿真结果数据存储到仿真结果库中, 仿真结果库由仿真系统负责构建, 存储内容包括原值、均值、均方值的处理。评估时从仿真结果库中取出指标的均值, 经归一化处理后作为评估计算的评估指标数据输入。

(1) 越大越优型

越大越优型是指标值越大越好, 如网络最大吞吐量等, 越大越优型归一化函数如图 6.4 所示。越大越优型指标归一化函数中, $x(1)$ 和 $x(2)$ 根据指标类型不同而不同, 从 $x(1)$ 到 $x(2)$, 指标值越大, 指标越优, 归一化值开始变大, 直到到达 $x(2)$ 为最优, 归一化值为 1; 当指标值大于 $x(2)$ 后, 指标都为最优, 都为 1。

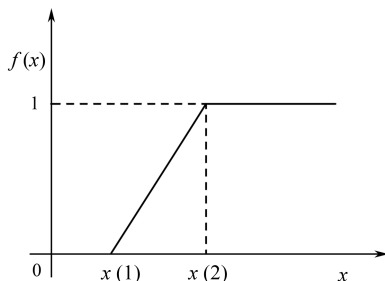


图 6.4 越大越优型指标归一化函数

(2) 越小越优型

越小越优型是指标值越小越好, 如业务端到端传输时延及时延抖动等。越小越优型归一化函数如图 6.5 所示。越小越优型指标归一化函数中, $x(1)$ 和 $x(2)$ 根据指标类型不同而不同。当指标值小于 $x(1)$ 时, 都为最优, 归一化值为 1。当指标值在 $x(1)$ 和 $x(2)$ 之间时, 指标归一化值下降, 直到到达 $x(2)$ 为最差, 归一化值为 0。

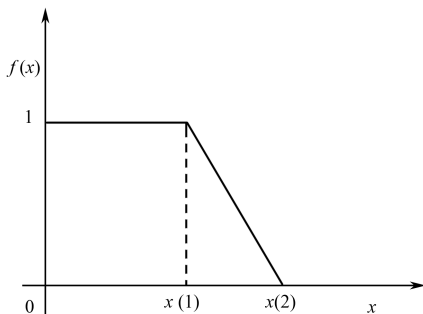


图 6.5 越小越优型指标归一化函数

(3) 中间型

中间型是指标值不能过大或过小, 当指标值在一个区间范围内为最佳, 中间型归一化函数如图 6.6 所示。中间型指标归一化函数中, $x(1)$ 、 $x(2)$ 、 $x(3)$ 、 $x(4)$ 根据指标类型不同而不同。当指标值在 $x(1)$ 和 $x(2)$ 之间时, 归一化值从 0 逐渐变大; 当指标值在 $x(2)$ 和 $x(3)$ 之间时, 归一化值为 1; 当指标值在 $x(3)$ 和 $x(4)$ 之间时, 指标归一化值下降, 直到到达 $x(4)$ 为最差, 归一化值为 0。

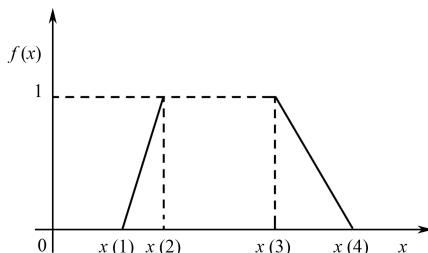


图 6.6 中间型指标归一化函数

2. 定性指标量化表

定性指标的量化分为两种方式：标度法和功能法。

标度法，即将定性指标划分为多个等级，例如优、良、中、差四个等级。假设评估系统采用 9 个等级对定性指标量化，如表 6-1 所示，由试验或专家确定定性指标所处的等级，从而得到定性指标的量化值。使用时，通过录入界面将试验或专家判定结果录入到数据库中，计算时转化为对应的量化值。

表 6-1 定性指标量化表

最差	很差	差	较差	一般	较好	好	很好	最好
区间（建议）	[0.2,0.3]	[0.3,0.4]	[0.4,0.5]	[0.5,0.6]	[0.6,0.7]	[0.7,0.8]	[0.8,0.9]	[0.9,1]
输入值								

功能法是根据指标类型，如果是功能性指标，测试时，系统具有此功能时值为 1，不具备此功能时为 0。

6.3.3 评估算法

1. 灰色聚类

设有 n 个对象， m 个评估指标， s 个不同的灰类，对象 i 关于指标 j 的观测值为 x_{ij} ， $i=1, 2, \dots, n$ ； $j=1, 2, \dots, m$ ，评估算法就是要根据 x_{ij} 的值对相应的对象 i 进行评估、诊断。以下采用基于三角白化权函数的灰色评估方法，具体步骤如下：

第一步：按照评估要求所划分的灰类数 s ，将各个指标的取值范围相应地划分为 s 个类型，例如将 j 指标的取值范围 $[a_1, a_{s+1}]$ 划分为 s 个区间：

$$[a_1, a_2], \dots, [a_{k-1}, a_k], \dots, [a_{s-1}, a_s], [a_s, a_{s+1}]$$

式中， a_k ($k=1, 2, \dots, s, s+1$) 的值一般可根据实际情况的要求或定性研究结果确定。

第二步：令 $\lambda_k = (a_k + a_{k+1})/2$ 属于第 k 个灰类的白化权函数值为 1，连接 $(\lambda_k, 1)$ 与第 $k-1$ 个灰类的起点 a_{k-1} 和第 $k+1$ 个灰类的终点 a_{k+2} 得到 j 指标关于 k 灰类的三角白化权函数 $f_j^k(\cdot)$, $j=1, 2, \dots, m$; $k=1, 2, \dots, s$ 。对于 $f_j^1(\cdot)$ 和 $f_j^s(\cdot)$ ，可分别将 j 指标取值域向左、右延拓至 a_0 , a_{s+2} ，如图 6.7 所示。

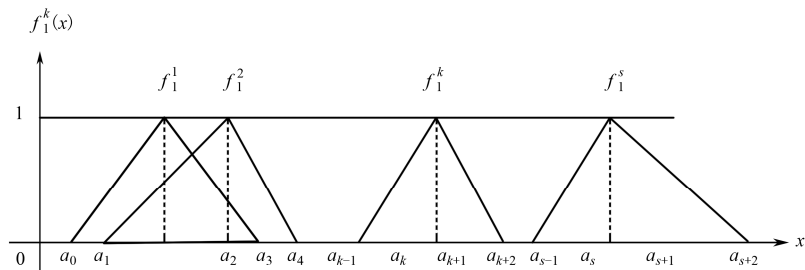


图 6.7 白化权函数

对于指标 j 的一个观测值 x ，可由公式

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_{k-1}, a_{k+2}] \\ \frac{x - a_{k-1}}{\lambda_k - a_{k-1}}, & x \in [a_{k-1}, \lambda_k] \\ \frac{a_{k+2} - x}{a_{k+2} - \lambda_k}, & x \in [\lambda_k, a_{k+2}] \end{cases} \quad (6-4)$$

计算出其属于灰类 k ($k=1, 2, \dots, s$) 的隶属度 $f_j^k(x)$ 。

第三步：计算对象 i ($i=1, 2, \dots, n$) 关于灰类 k ($k=1, 2, \dots, s$) 的综合聚类系数 σ_i^k ：

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j$$

式中， $f_j^k(x_{ij})$ 为 j 指标 k 子类白化权函数； η_j 为指标 j 在综合聚类中的权重，并且 $\sum_{j=1}^s \eta_j = 1$ 。综合聚类系数 σ_i^k 的含义就是对象 i 属于该灰类的程度。由于有 s 个灰类，因此这里也就有 s 个综合聚类系数。

第四步：由 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$ ，判断对象 i 属于灰类 k^* ，即在 s 个综合聚类系数中取出最大值，并确定对象 i 在 j 指标下属于该灰类 k^* ；当某个对象在不同的指标下同属于 k^* 灰类时，还可以进一步根据综合聚类系数的大小确定该对象处于不同指标下的优劣或位次。

第五步：确定战术通信系统的效能。假设效能有 m 个评估指标（准则）， s 个不同的灰类，对象 i 关于指标 j 的观测值为 x_j , $j=1, 2, \dots, m$ ，因此也可以通过第一步到第四

步来确定某一准则在某指标组下的评估值（最大综合聚类系数）。最终确定效能时，准则层就成为指标，量化过程中要考虑该准则在下一级指标作用下的综合聚类系数。因此可以重复第一步到第四步来求得系统效能的综合聚类系数，在第三步计算时，需要将准则在下一级指标下作用下的综合聚类系数考虑进去，即作为其对整体效能的贡献，因而，在计算效能关于灰类 k ($k=1, 2, \dots, s$) 的综合聚类系数 σ^k ，需用下式：

$$\sigma^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_j) \cdot \sigma^\circ \cdot \eta_j$$

式中 σ° 为准则在下一级指标下作用下的综合聚类系数。找出综合聚类系数 σ^k 关于灰类 k ($k=1, 2, \dots, s$) 的最大值，即系统效能属于该灰类，也就是属于此评估区间，如优、良、中、及格、差五个等级的某一级。

2. 模糊评判

模糊评判法是随着模糊数学的诞生而逐步发展起来的一种效能评估方法。该方法适用于存在模糊因素且评估指标集之间具有一定等级关系的综合系统。该方法以每个评估指标的评估结果为基础，而每个评估指标都是由下一层的若干评估指标决定的，所以该方法的实现过程是自下而上的。由于战术通信系统的性能评估指标体系是基于层次分析法的方式建立的，具有逐级层次关系，因此，模糊评判适用于战术通信系统的性能评估。

下面，以两级模糊综合评判模型为例介绍模糊评判法的基本过程：

第一步：确定评估指标的等级集：将指标集 Y 按某些属性分解成第一级评估指标集 $Y_1 = \{Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1m}\}$ 和第二级评估指标集 $Y_2 = \{Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2n}\}$ ，而且 $Y_1 \cup Y_2 = Y$ ， $Y_1 \cap Y_2 = \phi$ 。

第二步：建立评估指标的权重集：为了反映评估体系中的各个评估指标相对重要性的不同，需要赋予相应的权值。设第一级评估指标的权重向量为 $A_1 = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ ；以第二级评估指标的权重向量 A_{2i} 为行构造权重矩阵，得到 $A_2 = \{A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2m}\}'$ ，其中 $A_{2i} = \{\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{im}\}$ ($i=1, 2, \dots, m$)。

第三步：建立评估结果的备择集：备择集是评估者对待评估系统可能做出的各种评估结果所构成的集合。如果可能的评估结果共有 p 个，则备择集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ 。

v_k' ($k=1, 2, \dots, p$) 是由很好、好、较好、较差、差等类别性语言表达的模糊概念。

第四步：计算单因素评判矩阵：从第二级评估指标集的单个因素 Y_{2j} 出发，确定待评系统相对于备择集元素的隶属度，即模糊向量。对不同性质的指标，应采取不同方法计算指标的模糊向量。设第二级评估指标 Y_{2j} ($j=1, 2, \dots, n$) 相对于备择集 V 中元素的模糊隶属向量 $R_{2j} = \{r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jp}\}$ ，其中 $\sum r_{jk} = 1$ ， $r_{jk} \geq 0$ ($j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p$)。然后，以所有单项指标的模糊向量为行构造第二级评估指标集的单因素评判矩阵 $R_2 (n \times p)$ 。

第五步：综合评判：第二级综合评判结果 R_1 就是第二级指标的权重矩阵 A_2 与单因素评判矩阵 R_2 的乘积， $R_1 = A_2 \times R_2 = (B_1, B_2, \dots, B_m)'$ ，（ $i=1, 2, \dots, m$ ）。将第二级综合评判矩阵 R_1 进行加权综合，就得到了 $R = A_1 \times R_1 = (b_1, b_2, \dots, b_p)$ ，待评系统的模糊综合评判结果。

第六步：确定评判结论：若待评系统只有一个，可根据最大隶属度法则，将备择集中的 v_f （ f 是 b_1, b_2, \dots, b_p 中的最大值 v_f 所对应的下标）作为该系统的综合效能结果。

6.4 战术通信评估体系架构

战术通信系统效能评估主要是依据评估指标体系，将仿真试验数据、测试试验数据、专家判定数据作为指标体系中的指标数值，结合科学的评估模型，完成战术通信系统效能综合评判，衡量系统的总体综合能力，度量战术通信系统在给定的条件下满足特定要求的能力，为战术通信系统的设计、研制、应用优化提供依据。

目前，基于平台以及 C3I 和 C4I 的系统效能评估方法比较多，并且大多数效能评估系统都是针对具体特点的评估模型，进而造成在评估系统结构设计和应用上存在以下两点缺陷：

（1）以往大多都是针对特定的装备系统进行效能评估，评估模型是特定、单一的，并且评估模型中的各个组成部分紧密耦合，关联性很大，因此各子模型的重复利用率比较低。

（2）在原有的架构上，如改变评估的参数，修改评估指标体系、增加评估算法等，都需要重新修改效能评估系统的软件结构，使软件利用率太低，进而出现大量重复开发，甚至全新开发的情况，浪费人力物力。

战术通信系统效能评估在设计时，吸取以往同类软件存在的问题，并按照灵活性和通用性的要求，不仅具有效能评估的功能，而且还具有以下特点：

（1）实用性、可操作性强。战术通信效能评估使用图形建模技术，操作简单容易，用户可根据评估需要，灵活组织构建不同的评估项目，选择不同的评估模型等，能适用于不同层次的用户，易于推广使用。

（2）定性分析与定量计算相结合，专家判定与数学模型计算相结合。利用专家判定进行定性分析，然后再对定性指标进行量化处理，在此过程中，通过科学的数学模型进行分析、综合处理，提高了评估的客观性和完备性，进而提高评估结果的可信性。

（3）模块化设计，组件化构成。根据评估涉及内容，将系统划分为独立的模块，各自独立完成模块功能，通过定义的模块接口，实现模块再组建，使系统不仅具有很好的扩展性，而且能够扩展系统的应用范围。

(4) 图形、图表、文档输出。系统能够进行两维、三维数据显示分析, 可对评估结果以各种图形、图表、文档的形式展现。

战术通信系统效能评估由评估输入、评估处理、评估输出三部分组成, 其系统体系结构如图 6.8 所示。

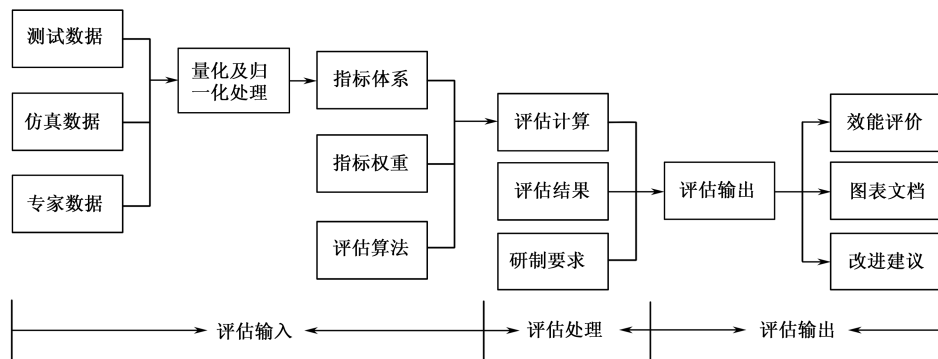


图 6.8 战术通信系统效能评估体系结构

(1) 评估输入

评估输入完成评估数据输入工作。首先确定效能评估的指标体系、指标体系中的指标权重、评估算法, 然后将系统联试的测试数据、仿真验证的仿真数据以及专家判定的专家数据, 经过量化及归一化处理后, 输入到指标体系中对应的指标中, 作为指标量化数值。

(2) 评估处理

评估处理完成系统效能的数值计算。在指标体系、指标权重、评估算法以及指标量化值的基础上, 完成系统效能的综合计算, 也可将本次评估计算结果与历史评估结果及研制任务书的研制要求进行对比分析, 为系统性能优化及改进提供支撑。

(3) 评估输出

评估输出完成系统效能评估结果输出。首先, 以图形、文档的形式输出对系统效能的评估结果, 然后根据评估结果及对比分析结果给出系统优化及改进建议与意见。

第7章 战术通信仿真试验方法

随着战术通信系统发展,通信系统复杂性和规模日益增大,影响系统性能的因数也越来越复杂,仿真试验计算量随着研究变量的增加而急剧增长,有时甚至超出计算机软硬件平台所能承受的范围。例如,总共需要分析 15 个变量,每个变量有 10 种取值,则采用遍历的方法需要进行 15^{10} 次试验,假如采用先进的仿真试验平台使每次试验的时间降低到 10min,最终所需的时间仍然要几十万年,显然这是难以接受的。为了降低战术通信系统仿真试验的计算量和次数,得到比较全面而权威的试验结果,有必要对战术通信系统仿真试验的设计方法进行深入的研究。本章首先从概念和理论对试验设计进行了研究,结合战术通信系统仿真试验特点,给出战术通信分布式半实物仿真试验的一般设计方法。

7.1 基本概念

试验设计(Design of Experiment, DOE)是以概率论和数理统计为理论基础,经济地、科学地安排试验的一项技术。它主要是在试验时选择有代表性的样本点,能够减少试验次数,节约试验成本,缩短试验周期,在农业、化工、电子、生物工程、土木工程等领域得到了广泛的应用。

试验设计的基本思想是英国统计学家 R.A.Fisher 于 1926 年提出的,随后在 1935 年出版了他的名著《试验设计法》。经过各国科学家的艰苦探索,现已形成了各种试验方法,如我国目前普遍使用的“优选法”和“正交设计”,都取得了丰硕的成果和巨大的效益。试验设计是数理统计学的一个重要的分支。多数数理统计方法主要用于分析已经得到的数据,而试验设计却是用于决定数据收集的方法。试验设计方法主要讨论如何合理地安排试验以及对试验所得的数据如何分析等。其要素包括:

(1) 试验目的

试验目的经常与试验指标搭配使用,如果仔细辨识,它们之间是具有一定差别的。试验目的是一种宏观的对系统的认识,它贯穿于试验的始终,是指导我们进行试验以及其设计的基础。

（2）试验指标

试验指标是衡量试验结果好坏的特征值，也是试验目的的一种具体化或量化形式，它可以描述全部或部分的试验目的。在一个试验问题中，如果只考察一个指标则称为单指标试验问题，如果考察两个或更多个指标则称为多指标试验问题。试验指标的选取对于试验最终结果的成功与否具有至关重要的作用。

（3）试验因子

试验因子也称输入，即影响试验结果的因素。一般就术语而言，因子与指标搭配，输入与输出或响应搭配。在实践中，试验因子的个数对试验设计方法的选择具有指导作用。影响试验指标的因素很多，由于试验条件的限制，不可能逐一或全面地加以研究。因此必须根据已有的仿真试验结果和专业知识和有关文献资料，科学、合理地制定试验条件。所以在肯定某因素作用很小而不选取外，对于凡是可能起作用的因素，都应选入进行考察，并且在因素不断筛选后，应重新选取试验因子。

（4）因子水平

试验因子所处的状态称为因子水平。因子的水平分为定性与定量两种，对定性因子要赋予该因子每个水平以具体含义。对定量因子，要求试验者根据试验的目的及性质，来确定各因子的水平数和各水平的取值。对于一般试验设计而言，其水平值的设置需要遵循实际规律，否则试验将无法进行；而对仿真试验设计而言，则不存在这样的问题。

（5）试验设计方法

试验设计方法是试验设计的重点，在确定了试验目的、指标，列出感兴趣的因子及其水平后，下一步就是要选择一个合适的试验设计方法。试验设计方法的选择对于试验是否可行、试验的效率以及结果的有效性都具有重要的影响。

科学的试验设计不仅能够节约资源、提高经济效益，而且可以提高试验精度，支持试验分析，找出影响系统的关键因素，优化系统方案。试验设计对于探索、分析、优化高度复杂、不确定的系统，是一种较好的方法，已经在农业、工业领域得到了广泛应用，其用途或可使用范围具体为：

① 比较试验：如果希望知道某个重要因子对响应变量具有什么样的影响。或该因子是否具有显著效应，则需要设计一种实验，比较因子的效应。类似于单因子试验设计。显著性分析得到关注评估要素的主要影响因素，将各因素对关注评估要素的影响程度定性为显著与不显著等；相关性分析对不同实验因素间的关联程度进行分析，通过对显著相关的实验因素的特定处理，弱化实验因素间的相关性。

② 筛选试验：如果遇到复杂的问题，该问题中具有若干个因子，而我们希望筛选出某些具有重要主效应的因子，则需要使用具有筛选目的的试验设计。

③ 优化因子搭配试验：响应是由诸多因子共同作用的结果，如果期望知道何种因子及其水平的最佳搭配能够获得最优响应，则需要优化因子搭配试验，或混合设计。

④ 回归分析试验：它与优化因子搭配试验类似，不过后者更倾向于对某一个响应值

的寻优,即寻找几个因子及其水平的最优搭配,得到该项响应的局部最优,而回归分析试验则更强调于调整模型参数或形式,获得更精确的模型,以此获得全局最优响应。

7.2 试验设计方法研究

试验设计方法是数理统计学的一个分支,是研究如何制定试验方案,以提高试验效率,并使试验结果能有效地进行统计分析的理论和方法。下面介绍常见的几种试验设计方法:

(1) 降维设计

降维法是把一个多因素的问题转化为一系列因素较少的问题,而因素较少的问题相对地说是比较容易解决的。由于多因素转化为较少因素的办法不同,因而就产生了各种不同的降维方法,如纵横对折法、平行线法、坐标(因素)转换法、陡度法、转轴法及方向加速法—鲍威尔法等。这类方法对于战术通信仿真试验不合适,因为我们无法确定其中哪些因素是主要的,哪些因素是次要的,更何况各因素间又有交互作用,很难进行降维。

(2) 模式设计

模式法就是按照事先规定的一些模式探索地前进。常用的方法有:单纯形调优法、矩形调优法及步长加速法等。此类方法虽有操作简便、便于记忆与易在计算机上实现的特点,但其局限性强,步骤比较复杂,不适合战术通信仿真试验。

(3) 完全随机设计

这种设计又称为单因子试验或一次一因子试验,它是最简单的试验设计方法之一,其设计单纯,即每次试验只变动一个因子,而其余因子必需保持固定,研究单因子的变化规律。它主要采用随机化技术,故又称为完全随机设计,该设计的目的是为了研究某一个主要因子的效应,在研究过程中不必考虑其他的干扰因子。它是根据重复和随机化两个基本原理设计的试验,试验的每一个处理都有若干个重复的试验单元,根据重复数相等与否又称为平衡(不平衡)完全随机设计,这些试验单元在试验中的地位是完全随机的。它的优点在于设计与分析比较简单,但是所能考察的因子个数以及因子水平较少、试验精度较差,且只能用于研究单个因子的主效应,无法考察因子之间的交互作用。因此,也不适应于战术通信系统仿真试验。

(4) 正交设计

正交试验设计法是一种多因素优选方法,正交表的特点是试验点均衡分散,试验点整齐可比,借助于正交表进行整体设计、综合比较、统计分析是一种快捷、可靠、方便的研究方法。因此正确地选择影响试验的正交表,合理地划分试验的水平,科学地分析

试验的结果，选择最佳工艺条件或最优设计方案，使研究人员所从事的项目达到一次成功的目的，在最短的时间里，取得最好的成绩。

正交试验设计是试验设计中最重要方法之一，能用少量的试验，提取出丰富的信息。正交试验设计是利用“正交表”进行科学地安排与分析多因素试验的方法，是一种高效、快速、灵活的多因素、单效应变量试验方法。其主要优点是能在很多试验方案中挑选出代表性强的少数几个试验方案，并且通过这少数试验方案的试验结果的分析，推断出最优方案，同时还可以作进一步的分析，得到比试验结果本身给出的还要多的有关各因素的信息。同常规方法相比，可大大减少试验次数和设计分析的繁杂，所获取的因素水平组合亦能达到较佳水平，因此已被广泛应用。

正交表是正交试验设计法中合理安排试验，并对数据进行统计分析的主要工具，最简单的正交表是 $L^4(2^3)$ ，如表 7-1 所示。

表 7-1 正交设计示例

列号 试验号	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

$L^4(2^3)$ 的含意为：“L”代表正交表，L 上角的数字“4”表示有 4 横行（简称为行），即要做四次试验；括号内的指数“3”表示有 3 纵列（简称为列），即最多允许安排的因素个数是 3 个；括号内的数“2”表示表的主要部分只有两种数字，即因素有两种水平 1 与 2，称之为 1 水平与 2 水平。

表 $L^4(2^3)$ 称为正交表是由于它有以下两个性质：（1）每一列中，不同的数字出现的次数相等，即 1 和 2 各出现 2 次；（2）任意两列中，将同一横行的两个数字看成有序数对（即左边的放在前，右边的数放在后，按这一次序排出的数对）时，每种数的出现的次数相等，即（1.1）、（1.2）、（2.1）和（2.2）各出现一次。凡满足这两个性质的表就称为正交表。

（5）均匀设计

均匀设计是一种应用广泛的试验设计方法，由中国方开泰和王元院士于 1978 年首先提出来的，它的主要思想就是在试验条件受限的情况下通过尽可能少的试验次数来推断出试验结果和影响试验结果的因素之间的关系。它之所以是一种有效的方法，就是因为它将有限的试验点均匀散布于所考察的变量空间，在缺乏先验的条件下达到了最大限度反映问题整体性的效果。我们采用均匀设计解决试验点在全空间内均匀散布的问题。

均匀设计是只考虑试验点在试验范围内均匀散布的试验方法，它挑选试验点的出发点是“均匀分散”而不考虑“整齐可比”，其数学原理是数论中的一致分布理论。即按照数论方法在试验范围内寻找散布得非常均匀的点集，再利用这些点集来安排试验，使试验结果既有代表性，又能减少试验次数。均匀试验设计法的关键是将数论方法应用于试验设计，以“均匀分散”为标准，使试验点均匀地分布在试验范围之内，使每个点有充分的代表性。

与正交设计相似，均匀设计也使用设计表来安排试验，且设计表的使用步骤类似。每一个均匀设计表有一个代号： $U_n(q^s)$ 或 $U_n^*(q^s)$ ，这里“U”表示均匀设计表，“n”表示 n 个不同条件的试验，“s”表示正交表最多可安排 s 个因子，“q”表示每个因子应取 q 个水平，有无“*”表示了两种不同的均匀设计表，通常有“*”的均匀设计表有更好的均匀性，应优先选用。表 7-2 给出了一个均匀设计表 $U_6^*(6^4)$ ，表示该表包含 4 个因子，每个因子有 6 个水平，总共要做 6 次试验。但是，与正交设计的不同之处在于，均匀设计除了设计表之外，还提供了与其对应的使用表。

表 7-2 均匀设计示例

因子 试验号	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
1	1	2	3	6
2	2	4	6	5
3	3	6	2	4
4	4	1	5	3
5	5	3	1	2
6	6	5	4	1

(6) 析因设计

析因设计又称网格化设计，网格无须保持一致，即可以存在一种 $2^{k1}3^{k2}$ 设计，其中有 $k1$ 个因子具有 2 个水平， $k2$ 个因子具有 3 个水平。如果网格保持一致，即每个因子都有 m 个水平，则根据是否对所有的处理组合进行试验，分为全析因设计和部分析因设计。

考虑 k 个因子，每个因子有 m 个水平的全析因试验，需要的运行次数为 m^k 。因此，随着因子数增加，运行次数呈指数倍增加。对于考虑具有适度因子数量且没有太多水平值的时候，全析因设计是特别有效的，其优点是可用来分析全部主效应，以及因子间各级的交互作用。当因子多于 5 个时，建议使用部分析因设计。

部分析因设计对全析因设计所考察的处理组合进行合适地选择，只对其中的部分进行试验运行。对于许多情况，在因子的两个（有时可能是三个）水平上考虑其对响应的影响就足够了，而为了能以尽可能少的运行代价获得最多的试验信息，人们多采用部分

析因设计。在部分析因设计中，有一个重要的概念，那就是“混淆”，比如我们用因子 x_1 和因子 x_2 的交互作用来估计因子 x_3 的主效应，这样就把因子 x_3 的主效应估计量与因子 x_1 、 x_2 的交互作用估计量混淆在一起。“混淆”是构建部分析因设计的基础，我们可以通过“混淆”来实现对某些交互作用的估计，但是不能对所有的高阶交互作用都进行估计。

以上列举几种常用的试验设计方法，比较上述试验设计方法，不能简单地说哪一种试验设计方法一定优于另一种试验设计方法，因为任何一种试验设计方法都有其适用的范围。因此，应该根据实际情况来选择合适试验设计方法。一般情况下，在选择试验设计方法时主要考虑以下几个方面：

- 试验的目的；
- 问题的复杂性，比如因子个数及其水平多少情况；
- 客观条件的限制，比如时间、资源等。

对于处理同一个问题的试验，可能有几种试验设计方法同时适用，那么我们将面对它们之间孰优孰劣的问题；也有可能碰到某一类问题，在现实中没有对应的原型或者我们对该系统了解甚少，此时我们将面对如何选择合适的试验设计方法的问题。选择试验设计方法是没有固定的标准的，只能根据具体的应用问题做出一些合理的选择。

表 7-3 列出了几种常用试验设计方法的一些性质。这些性质是在许多研究人员的工作基础上总结而来的。

表 7-3 试验设计方法对比

特性 \ 试验设计方法	完全随机设计	正交设计	均匀设计	析因设计
简易性	●	◎	◎	●
可控性	●	●	●	◎
用途广泛性	○	◎	◎	●
普适性	●	●	●	◎
输入多样性	●	●	●	◎
高效性	○	●	●	◎
正交性	○	○	○	●
均匀性	○	◎	●	◎
鲁棒性	○	◎	◎	◎
预测有效性	●	◎	◎	○
易用性	●	◎	●	●
● 试验设计方法很容易具有该性质 ◎ 试验设计方法在一定的限制条件下具有该性质 ○ 试验设计方法不具有该性质				

- ① 简易性：表示该方法原理简单，使用该方法比较容易。
- ② 可控性：表示该方法可由用户设置其运行次数，控制试验的运行规模。
- ③ 用途广泛性：表示该方法能胜任于多种试验目的。
- ④ 普适性：表示该方法具有拟合多种类型模型的能力。
- ⑤ 输入多样性：表示该方法支持连续/离散变量的组合输入。
- ⑥ 高效性：表示该方法可以快捷有效地分析大量因子（10个以上）的能力。
- ⑦ 正交性：表示该方法对因子的效应估计不受其他因子的影响。
- ⑧ 均匀性：表示该方法选择的试验设计点在整个试验设计空间中分布均匀，选择的试验设计点具有很好的代表性。
- ⑨ 鲁棒性：表示该方法对失败的运行不敏感，即不依赖于可能的失败的具体情况，该方法对不同类型的数据组合都能获得较好的结果。
- ⑩ 预测有效性：表示该方法具有对响应进行有效预测的能力。
- ⑪ 易用性：表示该方法易于使用统计包或程序快速生成设计。

7.3 战术通信仿真试验设计的特点

战术通信仿真的根本目的是为了进行战术通信系统的设计方案以及作战运用方案的评估优化，那么为了达到该目的，必须进行一系列有针对性的仿真试验。而战术通信仿真试验是一个分布式半实物仿真试验，其具有的复杂性决定了仿真试验探索空间异常庞大，因此，仅仅按照传统的方法进行试验、分析来寻找优化方案，其代价是不可以接受的。这就需要通过仿真试验设计来科学合理地安排分布式仿真试验，并获得有效的试验分析结论。

所谓分布式半实物仿真试验设计，简单地说就是在分布式半实物仿真试验过程中进行的试验设计。分布式半实物仿真试验设计与一般试验设计相同，都需要研究其中的试验设计方法，但是，分布式半实物仿真试验设计是与分布式半实物仿真密切关联的，试验设计如何开展是一个值得研究的问题。我们通过下面几个方面来对分布式半实物仿真试验设计与一般试验设计进行比较。

（1）试验设计的基础

一般试验设计是基于可试验观测的实际系统进行的，而分布式半实物仿真试验设计则是考虑仿真模型和实际系统相结合进行，这是二者根本的区别。

（2）试验设计的参与人员

进行试验设计时，需要考虑的重要因素之一就是客观条件的限制（比如时间、资源等）。对于分布式半实物仿真试验而言，由于其各种仿真资源部署在整个分布环境中并

且可能属于不同的部门，因此，参与试验设计的人员可能来自这些不同部门。

（3）处理试验因子

一般试验设计主要对可控因子进行处理，而分布式半实物仿真试验设计除了对可控因子进行处理外，还可能要使用概率论与数理统计知识来处理噪声因子以及与仿真运行有关的因子。

（4）试验设计的灵活性

一般试验设计是基于实际系统进行的，所以受到实际情况（比如费用问题）的限制，处理的因子范围有限，一般只考虑几个非常重要的试验因子；分布式半实物仿真试验设计中既要考虑实际设备也要考虑仿真模型，它可以考虑更多的试验因子，并且可以在因子的取值范围内选择任意感兴趣的设计点来进行试验。

（5）选择设计点

一般试验设计为了使随机误差的影响最小化，把试验设计点置于整个试验设计空间的边界或边界附近。而分布式半实物仿真试验设计把设计点填充在整个试验设计空间内，使得所选择的设计点更具有代表性。

（6）试验设计结果分析

一般试验设计通常寻求最优的因子水平搭配，而分布式仿真试验设计寻求在不同想定条件下的稳健策略集，比如因子的重要性排序。

7.4 战术通信仿真试验设计方法的选择

在试验设计过程中，核心的工作是根据具体的应用问题选择合适的试验设计方法，试验设计方法选择的合理性将直接影响试验的效率以及试验结果的有效性。对于试验设计方法选择没有固定的标准，只能根据具体的应用问题做出一些合理的选择。

对于分布式半实物仿真试验设计而言，根据分布式半实物仿真试验本身的特点以及参与试验设计的仿真人员只有有限的试验设计知识的特点，在选择试验设计方法时，主要考虑其以下性质：

① 简易性。仿真人员具有的试验设计知识有限，试验设计方法原理越简单越有适合于仿真人员。

② 可控性。试验设计方法具有可控性表示其允许由仿真人员制定其运行次数，控制试验的规模。试验设计的基本原则之一是可重复，即重复运行同一个试验方案，有利于对试验结果进行分析。

③ 高效性。高效性表示试验设计方法具有快捷有效地分析大量因子的能力。分布式半实物仿真试验设计需要考虑大量的设计因子，因此，试验设计方法的高效性非常重要。

④ 鲁棒性。鲁棒性表示试验设计方法对失败的运行不敏感。分布式半实物仿真试验中任何一个成员运行的失败都会导致整个仿真运行的失败，因此，希望失败的运行并不影响试验结果的分析。

考虑前面所列举的常用试验设计方法，即完全随机设计、正交设计、均匀设计、析因设计。在选择试验设计方法时，假设以上四个性质的重要度是相等的，即都为 0.25，并为试验设计方法具有这些性质的程度打分，具有该性质为 1 分，在一定的限制条件下具有该性质为 0.5 分，不具有该性质为 0 分。表 7-4 列出了打分的情况，其中总分是每项得分加权求和得出的。

表 7-4 试验设计方法评分

试验设计 特性	完全随机设计	正交设计	均匀设计	析因设计
简易性	1	0.5	0.5	1
可控性	1	1	1	0.5
高效性	0	1	1	0.5
鲁棒性	0	0.5	0.5	0.5
总分	0.5	0.75	0.75	0.625

根据总分多少，在进行分布式半实物仿真试验设计时，首选正交设计和均匀设计，其次是析因设计，最后是完全随机设计和中心复合设计。但是，这只是在假设四个性质的重要度相等的情况下得出的结论，且打分不一定合理。在实际应用中可以根据具体情况确定性质的重要度，比如当对试验设计方法的简易性要求比较高时，就可以赋予简易性更高的权重，然后得出的结论可能是完全随机设计和析因设计更好。

7.5 战术通信仿真试验设计过程

战术通信仿真试验设计过程主要有四个阶段，即分析问题明确目标、筛选因子、试验方案的设计与实施以及试验结果的分析与验证。这四个阶段又可以细分为若干步骤。试验设计步骤如图 7.1 所示。

第一步：对试验问题进行系统的分析，明确分布式半实物仿真试验的目标并定义其度量标准，即确定试验指标。这一步是进行仿真试验设计的前提。

第二步：由于分布式半实物仿真试验涉及的因子众多，需要通过先期的筛选试验来筛选出关键的因子，并确定其影响趋势。

第三步：在筛选出关键因子的基础之上，进一步确定因子的水平，并选择合适的试

验设计方法，最后进行因子的显著性和相关性分析。

第四步：进一步分析因子间的影响关系，建立回归模型并进行回归分析，优化设计方案。

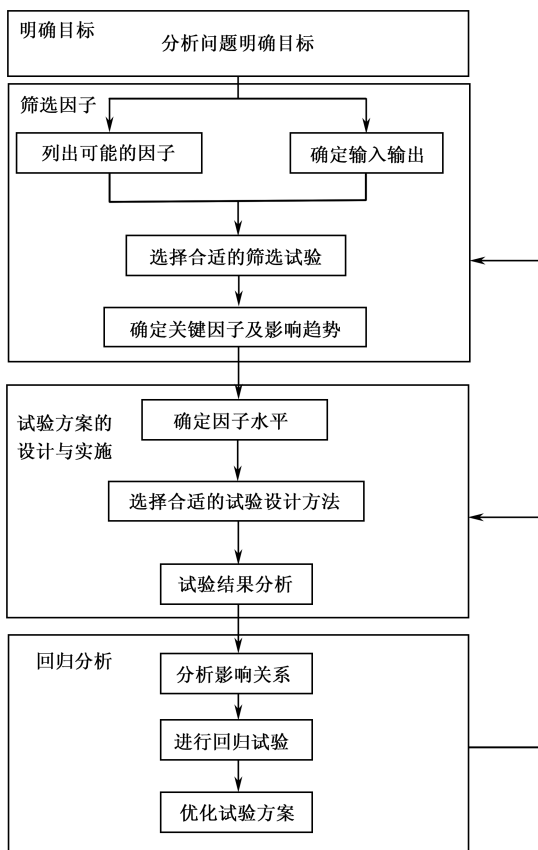


图 7.1 分布式半实物仿真试验设计流程

7.6 战术通信仿真试验与评估联合设计

战术通信仿真试验的根本目标是通过试验设计，科学合理地安排仿真实验，为评估系统提供评估数据，为评估分析提供可追溯的因素。如何将试验与评估统一起来，使得试验响应与评估指标体系关联起来，试验数据与评估数据关联起来，并根据试验响应与评估指标体系映射关系生成相应的数据采集单。考虑到分布式半实物仿真系统中成员分布在各个节点，试验与评估联合设计的主要技术如下：

（1）建立试验响应与评估指标体系映射

进行分布式半实物仿真试验设计时需要考虑试验响应变量，也就是仿真可采集的数据，通常是一些状态变量。这些试验响应变量是根据评估指标的要求进行设置的，最终为评估服务。因此，需要在试验方案的设计与实施阶段将试验响应变量与评估指标体系关联起来。

（2）生成数据采集单

在整个分布式半实物仿真环境中可能部署一个数据采集器，也可能部署多个数据采集器。对于前一种情况，只需为其生成一个数据采集单；对于后一种情况，可以把试验数据采集任务合理地分配给各个数据采集器，以提高数据采集的效率，因此，需要生成多个数据采集单。

（3）评估数据归并与评估样本预处理对接

将 HLA 仿真系统采集的评估数据进行归并，归并的工作为：首先将分布式半实物仿真的多个实验数据样本文件或并行仿真的单个实验数据样本文件进行合并，然后将合并后的文件格式转换成评估系统可以识别的数据格式。评估系统获取试验设计的数据归并文件后，开始进行一些简单的样本预处理工作，如战果统计等，为评估进行准备。

第8章 战术通信仿真环境构建实例

战术通信系统的发展初期一般采用的是经验、试验及计算等传统的网络设计方法,其中,经验设计的成效在很大程度上依赖于规划设计者具有的网络设计水平,其设计结果中的主观性成分比较突出。当网络规模较小、网络拓扑结构比较简单、网络流量不大的时候,以经验为主、辅之以试验和数学计算等手段进行网络规划设计还是可行的,这是因为网络设计者一般都具有比较丰富的网络设计经验和教训,而且网络较小时,网络试验和数学估算比较容易进行,其结果也比较可信。因此,以经验为主的网络设计方法在战术通信系统发展的早期被广泛地使用。

随着战术通信系统发展,网络规模越来越大、网络类型不断增多、网络拓扑日趋复杂、网络流量纷繁交织时,以经验为主的网络设计方法的弊端就越来越显现。首先,由于系统的复杂性,分工越来越细,网络规划设计者不可能非常深入了解各个技术细节,某些设计者相对来说缺乏大型网络的设计经验,因此在设计过程中主观的成分更加突出;第二,一般情况下,不可能在网络设计阶段开展与拟建网络规模可比的网络试验来获得设计所需的依据,小规模试验是可行的,但是其结果受试验规模的限制,不能充分满足规划设计的需要;第三,数学计算和估算方法对于大型复杂网络的应用往往是非常困难的,得到的结果的可信性也是比较低的,特别是对于包交换、统计复用的数据网络,情况更是如此。

因此,随着网络的不断扩充,越来越需要一种新的网络规划和设计手段来提高网络设计的客观性和设计结果的可靠性,降低网络建设的投资风险。分布式半实物仿真技术以其独有的方法能够为网络的规划设计提供客观、可靠的定量依据,缩短网络建设周期,提高网络规划、设计和建设中决策的科学性,降低网络建设的投资风险。

战术通信仿真环境的建设正是在这种需求拉动下应运而生的。战术通信仿真环境综合利用部分实物系统、模拟系统和计算机仿真系统,通过不同系统仿真实验的互补性,建立的兼顾经济性、可扩展性、可信性、规模性的综合试验仿真平台。其中计算机仿真系统主要完成战术通信系统应用实验的节点编配中实物、模拟手段没有覆盖的作战要素或节点的建模与仿真,完善整个系统的体系结构,是战术通信仿真环境建设的重要组成部分之一。计算机仿真系统是以战术通信系统为建模对象,构建的能够与实装节点、模拟节点互联互通的战术通信分布式半实物仿真系统,可为战术系统建设的系统层面、技术层面及其他相关领域的技术研究提供仿真试验平台,提供规模扩展、虚拟战场环境仿真等

试验验证手段。本章以第3章到第7章所介绍的方法为基础,介绍相关技术在战术通信仿真环境的具体实现方法。

8.1 仿真实验环境设计

8.1.1 应用目标

战术通信仿真环境是以支撑战术通信系统建设为根本目标,主要应用目标如下:

- ① 支持战术通信系统的多层次试验,能够完成设备、节点、系统及体系结构等多个层次和粒度的试验与验证。
- ② 支持战术通信系统的多方面试验,能够完成 C4ISR、系统安全、系统可用性等多个方面功能与性能的综合试验。
- ③ 支持战术通信系统生命周期内多个阶段的试验,能够支持在综合论证、系统及部件研制、系统集成与试验、装备部署等各个阶段的试验与验证。
- ④ 为战术通信系统创新发展提供新概念、新技术开发应用环境。

8.1.2 系统体系结构

战术通信仿真环境是一个应用可扩展、场景可定制、模型可重用、代码可移植、过程可交互、结果可显示的面向多种应用场合的通用分布式仿真开发与系统效能分析平台。具有标准接口的组件化仿真模型、支持跨平台、跨网络和远程共享的分布式半实物仿真与评估平台,仿真与评估系统可单独运行,也可通过网络进行共享实现远程登录、访问和使用,还可通过标准 XML (Extensible Markup Language, 可扩展的标记语言) 文件接口实现与军事想定系统、网络管理系统等的联合运行,为它们提供辅助决策支持。系统不仅可用于战术通信系统的仿真,也可通过开发新的模型和场景,应用于其他军事通信网络的仿真,还可与其他信息系统的仿真系统一起,构成满足更多应用场合和仿真目标的联合仿真系统。

战术通信仿真环境采用分布式中间件构建,逻辑上共分五层,从上到下分别为:应用层、接口层、交互层、网络支撑层和仿真基础层,如图 8.1 所示。

(1) 应用层

仿真应用层,在这一层,仿真应用开发者不需要关注下层的实现细节,只需要使用下层提供的服务即可,这样使得仿真应用开发将注意力集中在仿真目标问题领域,集中在优化仿真业务逻辑工作上。

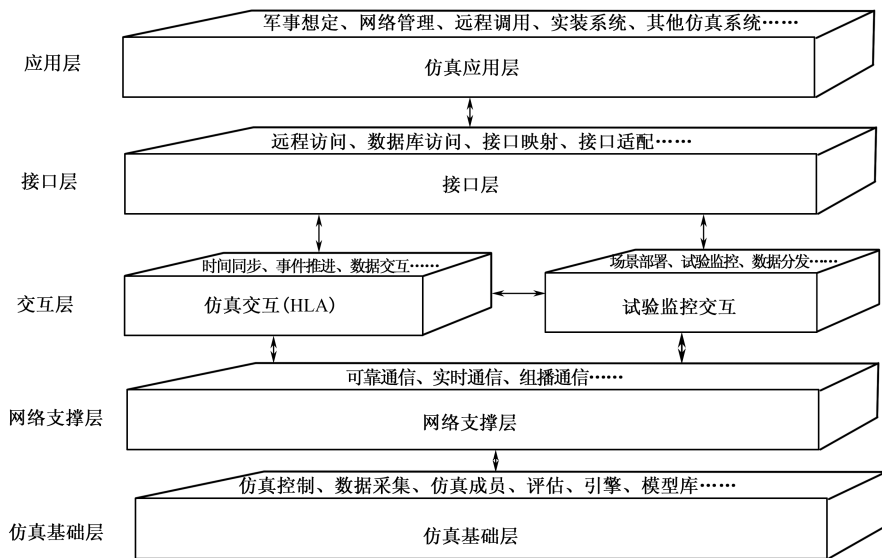


图 8.1 战术通信分布式半实物仿真系统体系

(2) 接口层

仿真接口层向上提供统一的仿真接口、可重用的组件和简便易用的仿真接口，对仿真系统可提供的仿真服务进行统一的封装，方便应用系统查询、使用和定制仿真系统和仿真任务，简化应用系统开发难度，使应用系统可快速方便通过仿真系统完成各种仿真任务。接口层以 IDL (Interface Definition Language, 接口定义语言) 为基础构建的标准接口，实现与各种仿真应用的接口、远程调用与协同、服务封装等。

(3) 交互层

交互层是分布式半实物仿真体系架构的核心层，主要由仿真交互组件和试验监控交互组件构成。仿真交互基于 HLA 架构，采用 PLM (product lifecycle management)、可扩展 HLA/RTI (runtime infrastructure)，支持复杂产品异地、协同、网络化设计中的产品数据及生命周期管理，支持广域网内仿真系统的资源共享与动态运行。仿真交互提供六大类服务（包括联邦管理服务、声明管理服务、对象管理服务、所有权管理服务、时间管理服务、数据分发管理服务）63 个基本功能给联邦成员使用。

试验监控交互完成分布式半实物仿真试验的监控和管理。试验监控对整个仿真联邦和所有仿真成员的运行状态实行全面的监控。包括对联邦管理成员加入联邦、退出联邦的控制管理。充分利用 RTI 信息资源和通信机制实现对联邦全面的管理。试验监控以仿真监控服务的形式提供。试验监控组件采用高性能分布式中间件实现，具备跨平台性和语言无关等优势。

(4) 网络支撑层

网络支撑层主要是为分布式半实物仿真提供数据分发传输控制通道和协议，进行

网络适配和映射,使分布于多个网络位置的仿真成员协同一致完成同一仿真任务,为分布式半实物仿真架构和仿真成员提供控制管理、数据采集、仿真事件、仿真信息交互的通道。

(5) 仿真基础层

仿真基础层为分布式半实物仿真提供基础支持,提供了仿真应用所需的各类跨平台、异构资源,包括仿真模型资源、仿真数据资源、仿真引擎、网络资源、计算资源等。它们根据分布式半实物仿真架构的调度和要求,建立与仿真应用系统要求对应的仿真场景,完成仿真任务,并将结果提交给应用系统。

战术通信分布式半实物仿真充分吸取现有分布式仿真体系架构的分布式、开放式、交互式以及互操作性和重用性等优点,解决它们在平台依赖、语言绑定等方面的问题,增加了分布式仿真试验的自动控制和管理以及远程访问等功能,扩大应用范围,并结合我军通信系统仿真与军事想定、网络管理系统、专家评估等联合运行的需求,以支撑军事通信系统特别是战术通信系统全程研制对仿真的需求为目标,以跨平台、支持跨网络和异构网络的分布式中间件为基础,开发符合我军应用特点与需求的具有自主知识产权的分布式半实物仿真运行平台。

8.1.3 系统组成

战术通信仿真环境建设包括战术通信半实物试验环境、接入试验平台、综合测试环境、试验数据分析与性能评估环境、试验控制与管理系统五个部分,其组成结构如图 8.2 所示。

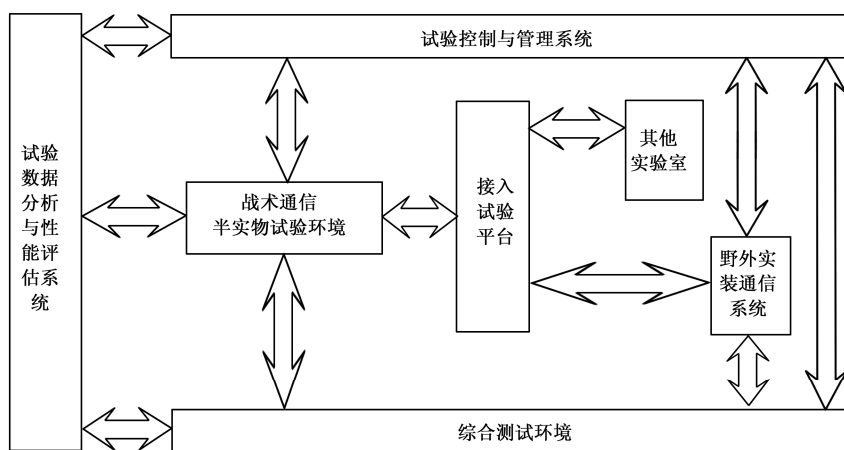


图 8.2 战术通信仿真环境组成结构

（1）战术通信半实物试验环境

战术通信半实物试验环境以战术通信系统为对象，采用实装、模拟、仿真的手段，将实装指控软件、实装路由交换设备、实装电台传输设备、模拟网络通信设备、模拟链路设备、模拟信息交互软件、半实物仿真节点等有机地结合起来，共同构建整个战术通信仿真环境的基础试验平台。战术通信半实物试验环境在试验控制与管理系统的规划和运行控制下，灵活组建不同的试验网络，实现对系统的模拟，为战术指挥控制系统体系结构试验与验证、兵种指挥控制系统联合试验与验证提供支撑平台。

（2）接入试验平台

接入试验平台由实装路由交换设备、实装电台传输设备、实装电台天线、商用路由器等组成，是提供多种接入能力的兵种指控信息接入控制系统，为实装车辆平台或实装分队等野外实装通信系统、其他仿真试验系统接入本战术通信仿真环境内战术通信半实物仿真系统提供基础接入平台，形成分布式跨地域的联合试验能力，为进行兵种指挥控制系统的联合试验和性能评估提供支持。

（3）综合测试环境

综合测试环境包括对硬件、软件、系统的测试工具和测试软件，以及由这些测试工具和软件构成的静态测试环境、野外机动试验环境和系统嵌入式试验环境，分为设备试验分系统、软件试验分系统、同车多机电磁兼容试验与分析分系统以及武器平台集成试验分系统四个组成部分。综合测试环境是战术通信仿真环境的测试中心，是形成部件以及武器平台试验与分析能力的基础，主要完成指控通信设备功能与性能测试、指挥控制软件集成与测试、典型武器平台集成试验和同车多机电磁兼容测试等，为部件（软件）、武器平台、系统及体系结构的论证、研制与试验提供试验支撑环境。

（4）试验控制与管理系统

试验控制与管理系统是战术通信仿真环境的控制与管理中心，由试验环境控制与管理分系统和试验运行控制与管理分系统构成，完成系统的试验规划、试验数据管理、仿真模型管理、试验初始化、试验运行控制、试验状态监控、时间同步等功能，使参与试验的各个节点能够相互协调稳定的运行，为战术通信仿真环境进行各种试验的试验方案配置、试验节点监控、试验运行控制以及试验数据管理等，提供基础的环境支撑。

（5）试验数据分析与性能评估系统

试验数据分析与性能评估系统由试验数据采集、试验数据统计与分析、系统性能评估组成，采用分级采集统一处理的方式，完成对各试验系统试验数据的实时收集、汇总、统计与分析，并利用试验数据和评估模型，对被测对象战技指标和系统性能进行评估。试验数据分析与性能评估系统是战术通信仿真环境的数据分析评估中心，是各种试验结果的输出中心。

8.1.4 工具选择与配置

仿真平台的选择很关键，它是仿真建模的第一步，“工欲善其事，必先利其器”，仿真平台就好比是“器”，好的仿真平台可以帮助开发者更精确的模拟仿真对象，可以减少人力资源的消耗，达到事半功倍的作用。因此在进行建模工作前，就必须确定一个合适的仿真平台。

战术通信系统是一个节点数量巨大，使用灵活的系统，它要求仿真平台能支持上百或上千的网络节点，网络节点支持静止和运动两种方式，并能够精确模拟地理环境信息，能够模拟无线信道，具有灵活的对外接口方式，能够支持 HLA 的接口，支持分布式半实物的仿真方式。就战术通信仿真系统的使用方式来说，要求仿真平台具有较好的人机界面，使用者能够直观的看到仿真场景，并能在界面上通过简单的人工操作，修改或进行仿真试验。就仿真性能来说，由于战术通信仿真系统是一个面向军方的系统，它对仿真的准确性有很高的要求，这就要求仿真平台具有可靠性、可信性，仿真平台中的标准模块必须得到验证，与真实世界具有很强的逼真性。就战术通信仿真系统的可持续性的特点，要求仿真平台支持再次开发，具有模块性，能够灵活地模拟新的协议，支持各种功能的定制等要求。

目前存在很多仿真平台，需要对它们的功能特性有一个明确的了解，才能判断是否适合用户的要求，在 1.4 节中对仿真平台有详细的介绍。对应用户的需求，可以对应用户需求，进行排查选择。表 8-1 给出了几种仿真软件的对比情况。

表 8-1 仿真软件对比

软件 性能	OPNET	NS-2	MATLAB	QualNet
界面友好性	GUI、代码	Tcl script	主要是代码	GUI、代码
拓扑结构配置	GUI、配置方便	Tcl script 代码编程	主要是代码	GUI、代码
支持的构件库	丰富的构件库	丰富的组件模块	丰富的工具箱	丰富的构件库
配置灵活性	一般	灵活	比较灵活	比较灵活
执行效率	较高	较高	低	一般
支持语言	C, C++	C++, OTcl	C/FORTRAN	C, C++, PARSEC
支持地形文件	支持	不支持	不支持	不支持
可扩展性	差	好	比较好	一般
兼容性	差	一般	一般	一般

续表

软件 性能	OPNET	NS-2	MATLAB	QualNet
主要应用场合	网络路由仿真	网络协议仿真、IP 网络	科学计算、矩阵运算	无线通信、无线 通信系统
主要特色	网络设备模型库； 混合建模；与网管的 接口	开放源码；免费； 良好的扩展性；广泛 的网络用户支持	功能强大、内容丰富 的工具箱；简单的脚本 编程	大规模网络支 持；标准分层模 型；批量仿真

根据仿真平台的对比分析，在战术通信仿真系统中选择 OPNET Modeler 作为仿真建模的开发平台，能够基本满足战术通信仿真建模的要求。

Opnet Modeler，近几年被第三方权威机构（Network World）评选为“世界级网络仿真软件”第一名。OPNET Modeler 是一套集开发和应用为一体的通信系统模拟软件，它采用面向对象的建模方法和图形化的编辑方式，支持在网络各个层次的设备、链路和协议的精确建模，并提供了丰富的外界开发接口。它是基于事件出发的有限状态机建模（Finite State Machine, FSM），避免以时间触发，变成以事件触发的建模，采用离散时间驱动的模拟机理，与时间驱动相比，计算效率得到了很大的提高。

目前，HLA 分布式仿真工具在市面上很多，MAK RTI3.0（HLA 支持平台）是唯一一个经过 DMSO 认证的支持 IEEE 1516 和 HLA 1.3 标准的商业化 HLA 开发工具，也是目前唯一一个经过 SISO 认证的支持 DLC 2.0 的 RTI 产品。因此选择工具和平台如表 8-2 所示。

表 8-2 开发工具和平台

软件名称	软件项描述	
	用途	厂家
Windows xp sp2	操作系统平台	美国 Microsoft
OPNET14.5	仿真开发工具	美国 OPNET
Wireless InSite	信道仿真工具	美国 REMCOM 公司
Microsoft Visual C++ 6.0 Enterprise Edition	编译环境	美国 Microsoft
MAK RTI3.0	HLA 平台	美国 MAK Technologies 公司
Oracle 9.x for Windows	数据库平台	美国 甲骨文

8.2 战术通信分布式半实物仿真设计

8.2.1 系统的结构与组成

战术通信分布式半实物仿真系统是战术通信仿真环境中战术通信半实物环境的核心部分。战术通信分布式半实物仿真系统集模型开发、仿真引擎、仿真规划、仿真控制、结果分析、效能评估等于一体,通过半实物接口网关实现与实装系统、模拟系统以及野外实装通信系统互连互通,构建战术通信半实物试验环境。战术通信分布式半实物仿真系统自成系统能够独立运行,此外,它作为战术通信仿真环境的一个组成部分,能够接受试验控制与管理系统的集中调度和规划,通过仿真数据库将半实物仿真的仿真分析和评估结果提供给试验数据分析与性能评估系统,进行大型的半实物仿真试验。

如图 8.3 所示为战术通信分布式半实物仿真系统结构组成图,战术通信分布式半实物主要由仿真想定与主控、效能评估、网络仿真、半实物接口网关四个子系统组成。它们通过战术通信仿真环境中的控制网络互连起来。

(1) 仿真想定与主控

仿真想定与主控(简称仿真主控)是整个分布式半实物仿真系统的控制中心与状态监控及调度中心,是整个系统的顶层设计者与规划者,负责整个分布式半实物仿真系统共性事件、公共属性与变量的处理与定制,不仅用于控制仿真系统与实物系统之间的调度与协调,而且还协调管理仿真系统内各仿真成员之间的协调与控制。主控能够控制、协调各个系统成员的仿真行为,根据需求动态监控各系统成员的态势、并根据相应的策略进行调度控制,满足整个仿真系统的任务时限、负载均衡和通信开销等要求等,负责整个系统从仿真前的规划准备,到联邦初始化过程,到运行阶段的管理控制,直至仿真完成后仿真结果收集和处理。仿真主控还能够接收外部试验控制与管理系统的调度命令以及试验场景定制要求,配合完成大型联合仿真试验。

(2) 网络仿真

网络仿真子系统是整个系统的核心,由一系列仿真节点(每个仿真节点为一个计算机仿真联邦成员)构成,运行在一个通过局域网互连的计算机群中。它主要对战术通信网的各种通信平台、设备、协议进行建模和设计,包括物理信道模型、数据链路模型、网络协议模型、网络设备模型、网络结构和组织应用模型等。每一个仿真节点具有模块化组织运用能力,具有师、团、营、连、单车等多层次,协议、技术体制、设备、节点、系统等多粒度的仿真建模能力。

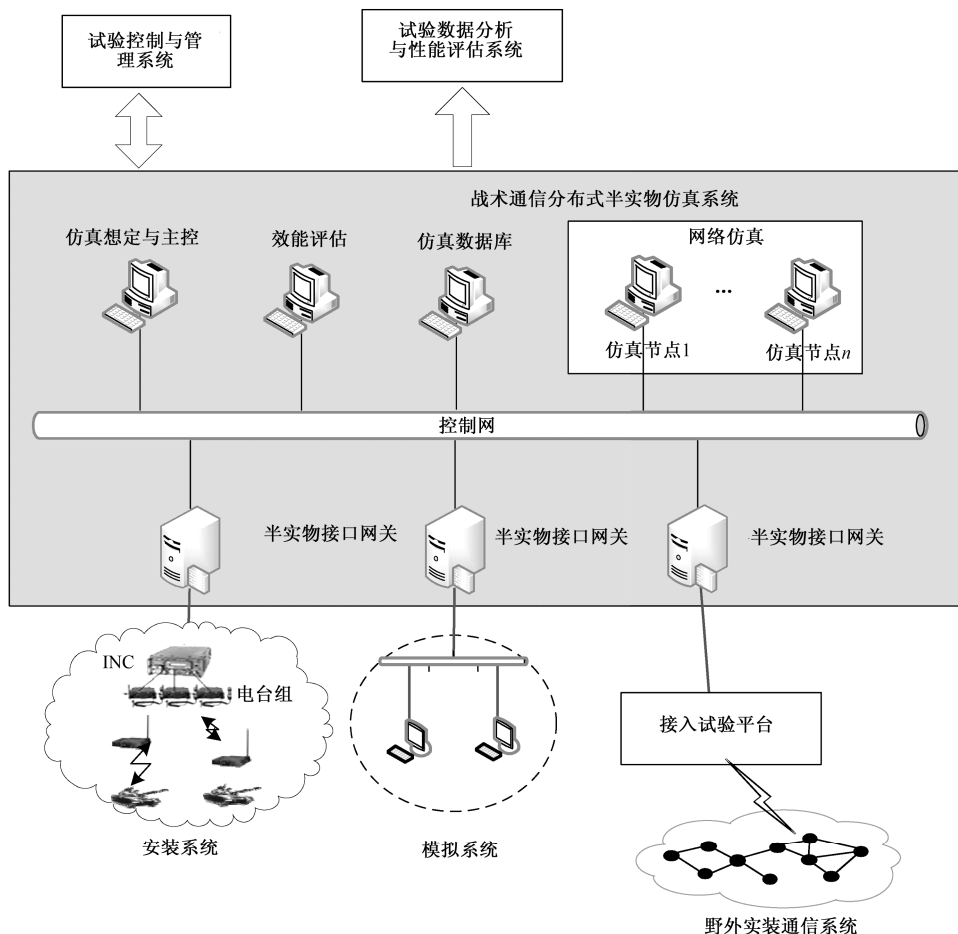


图 8.3 战术通信分布式半实物仿真系统结构组成

(3) 仿真数据库

仿真数据库主要用于存储仿真试验输入数据、试验运行中过程数据、试验结束后的仿真结果数据以及效能评估结果数据。其中存储仿真试验的数据由想定数据库、仿真结果库构成，分别存储仿真想定数据、仿真结果数据；存储评估数据由实测数据库、专家判定库、研制指标库和评估结果库构成，分别存储实测数据的结果、专家判定的指标和指标权重数据、研制指标数据、评估结果数据。

(4) 效能评估

效能评估系统主要就战术通信系统的通信性能进行评估分析。评估系统由指标体系库、评估算法库和评估模型组成。指标体系库是根据战术通信系统的研制要求中必须满足的主要技术指标建立的指标库。评估算法是对战术通信系统对应的指标体系中实测的或是仿真的数据结果进行计算和处理的方法。评估模型依据指标体系和评估算法，利用合适的数学计算得到系统的效能。评估的数据来源可以是战术通信仿真的半实物试验数

据也可以是野外综合测试相关试验数据。效能评估系统能够通过必要的技术性能指标,并结合科学的建模与分析方法,衡量战术通信系统的总体综合能力,同时提供有效的测试和评估手段,评估战术通信系统在不同应用下的网络总体性能,分析各分系统与设备对总体性能的影响,验证和优化系统的组织运用方式。

(5) 半实物接口网关

半实物接口网关完成仿真系统与实物系统的接口转换与控制,执行仿真管理与控制的命令,执行仿真时间、事件与信息向实物系统的传递与协调,进行信息格式的转换,与仿真网络交换必要的业务和路由信息,完成双向代理的功能。它一方面对仿真系统提供实装系统、模拟系统的仿真镜像,把实装系统、模拟系统作为仿真系统的一个内部成员,完成与仿真系统一样的功能;另一方面对实装系统、模拟系统提供虚拟网络,使仿真系统所构成的网络对实物系统、模拟系统就像一个真实的网络一样。接口控制还执行必要的数据采集等功能,以采集实物系统、模拟系统的各种性能参数。

半实物仿真主要由半实物接口网关将实装系统、模拟系统或是野外战术通信系统与仿真网络互联而成,半实物接口网关支持多种接口与实装系统、模拟系统互连。半实物接口网关主要完成实物包的截获和过滤、实物包和仿真虚拟包的相互转换、仿真推进管理、网络性能统计等功能。

战术通信分布式半实物仿真系统基于五层构建的分布式仿真体系架构,通过仿真基础层、网络支撑层、交互层以及统一的接口层建立分布式半实物仿真支撑环境灵活的适配各种仿真应用。在战术通信分布式半实物仿真系统设计中采用了基于双总线控制的分布式半实物仿真技术实现途径,如图 8.4 所示。

目前,基于 HLA (High Level Architecture, HLA) 的分布式仿真架构成为了分布式仿真的主流技术,HLA 技术解决了分布式仿真中大规模、跨平台、互操作等问题。然而没能实现分布式仿真试验中自动化集中监控和管理分布式仿真试验的功能。

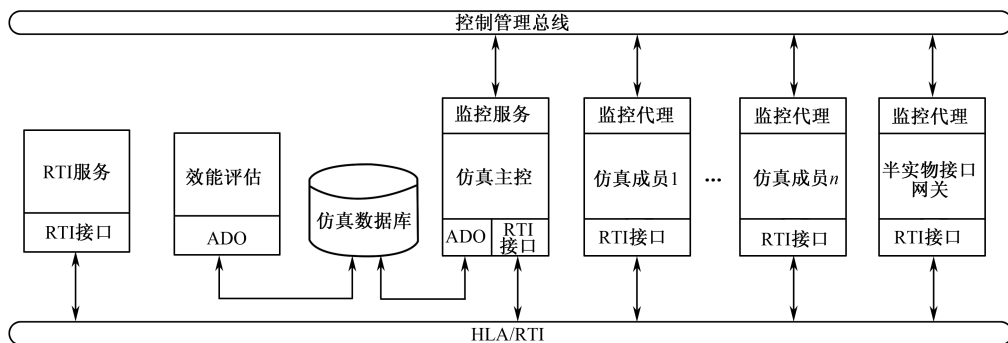


图 8.4 基于双总线控制的分布式半实物仿真系统

通常,分布式仿真系统是由多个仿真子系统通过网络互连而成的大规模仿真试验系统。不同仿真子系统会部署在不同的房间或场所,仿真子系统的数目可能会几十个甚至上百个,仿真试验的时间可能是几个小时、甚至是几天。如果单纯由试验人员(每一个子系统需配备一名试验人员)手工操作和监视,势必需要大量人员的长时间参与。对具有子系统众多、分布地域广、运行时间长等特点的分布式仿真试验,如何集中监控管理成为急需解决的问题。

战术通信分布式半实物仿真系统创造性采用了双总线技术架构,在 RTI 总线上实现仿真时间、同步事件的推进以及仿真联邦成员间的仿真数据交互;在监控总线上,主要用于传输仿真试验的控制管理数据,通过服务/代理的架构,仿真主控的监控服务通过远端部署到仿真联邦成员以及半实物接口上的监控代理实现对各个参与分布式仿真试验的子系统实现远程监控和管理。

采用双总线的控制架构,使分布式仿真数据交互和仿真控制管理数据分离,提高了分布式仿真的推进效率和运行的稳定性,实现了从仿真试验前到试验结束后的全过程控制管理的能力;采用服务/代理的架构,实现了仅在一个监控界面上集中远程监控和管理的能力,减少了分布式仿真试验人员参与的数量;采用数据/模型相分离的架构,实现了仿真数据集中管理和存储,增强了仿真试验的可重用性、扩展性和数据分析能力。分布式仿真双总线控制管理平台集成以上技术建立了一套集中控制和管理分布式仿真试验的完整解决方案。

8.2.2 仿真想定与主控

1. 主要功能

仿真想定与主控系统作为联邦总管负责整个系统从仿真的规划准备、整个联邦的初始化,到运行阶段的管理和控制,直至事后的仿真结果的存储和显示。

仿真想定与主控系统具体功能包括:

- 仿真想定:根据作战想定,完成仿真想定生成,包括网络场景想定、业务想定;
- 数据维护:负责仿真系统试验运行数据的维护和管理,包括仿真试验的输入数据、运行数据、仿真结果数据;
- 仿真试验初始化:仿真主控根据仿真试验想定结果(如网络拓扑规划结果以及业务流量规划结果),对参与试验的各个仿真联邦成员进行初始化,完成试验运行的准备工作;
- 仿真控制:包括从仿真试验的设置初始化到试验运行以及仿真试验结束后的仿真统计结果的采集,实现整个仿真试验全过程的自动控制;
- 运行状态监控:负责仿真的各个试验运行状态和系统运行状态的监控;

- 时间同步：对参与试验的各个仿真成员的物理时间的同步和仿真时间的同步。

2. 结构组成

仿真想定与主控系统采用集中管理和分层、分布式控制相结合的控制管理策略，系统包括仿真想定、试验管理和试验控制三个子模块，其组成结构如图 8.5 所示。

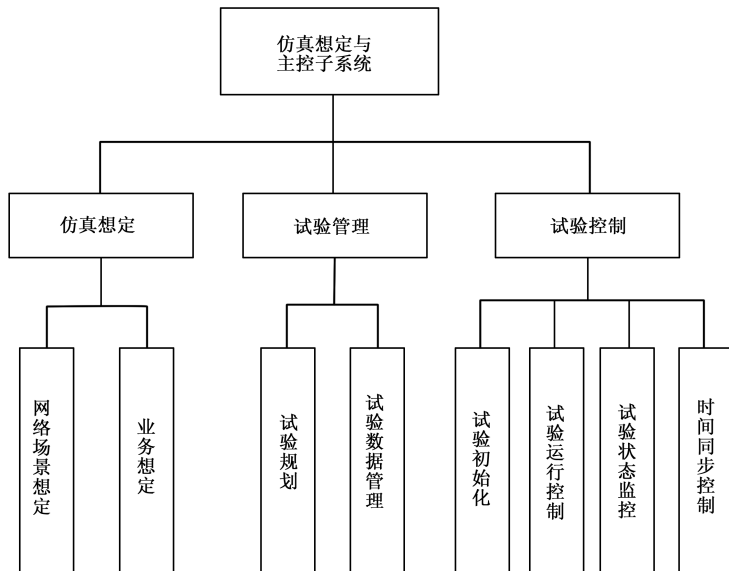


图 8.5 仿真想定与主控系统模块划分

其中，仿真想定模块主要负责网络场景想定和业务想定；试验管理模块主要负责试验方案的生成，试验数据、试验过程记录和试验结果的维护与管理，提供对各种试验相关数据的集成处理功能；试验控制模块主要为仿真试验提供运行控制与状态监视的功能，负责在分布式的试验环境中完成试验节点的配置、试验的运行控制、状态监控和节点间的协同工作。

仿真想定与主控系统的各模块完成的主要功能如下：

(1) 网络场景想定模块

网络场景想定模块可以根据作战想定生成网络仿真场景，并完成仿真场景中节点的属性配置，如 IP 地址分配，信道参数配置等。可以根据实际情况规划成多个仿真联邦成员，并将最终形成的仿真场景规划文件，存入数据库中。

(2) 业务想定模块

业务想定模块是根据网络场景想定模块的规划结果，配置业务规划文件，产生具体的网络业务流量。实际网络的流量是很复杂的，往往带有随机性，不可能完整精确的描述，只能是通过分析提取其主要特性，用尽可能有限的参数来描述。其次，业务流模型

应尽可能接近真实业务流的特性，对业务流的预测和实际测量应该可以转化为一定量的数值，精确反映系统的业务流量。实验经验证明，通信网络的呼叫间隔、呼叫强度、通信时长、服务时长等都符合一定的统计分布特性。在理论分析上，统计分布特性对于网络传输的性能评价具有简单、有效等显著特点。因此在模型业务生成系统中，我们通过业务流产生时间概率分布、包大小概率分布来描述简单的统计分布的业务。常用的统计分布模型、参数和典型的应用如表 8-3 所示。

表 8-3 概率分布类型

分布类型	参数	典型应用
贝努里分布	均值	随机试验
常数分布	输出值	常数流模型
爱尔兰分布	顺序、均值	电路交换网络的呼叫
指数分布	均值	间隔时间
正态分布	均值，方差	包大小
泊松分布	均值	业务产生时间
均匀分布	最小值、最大值	目标地址

战术通信包含态势、指控、自由文书、图像、语音等业务，不同业务的业务流量具有各自不同的特性。建立业务流模型时，不可能对每一种业务流采用同一种业务特性描述。常用的方法是根据不同的业务种类，对其流量特性的各个方面分别进行描述，分别建立起业务流模型。例如：对于数据业务，一般用发送间隔时长、数据包大小等参数描述。将业务进行分类描述后，就可以建立战术通信系统的业务流模型。如图 8.6 所示为业务想定软件界面。业务想定生成软件能够导入战术通信的网络编配信息建立目录树，根据作战想定的要求生成业务想定文件。业务想定文件通过仿真主控在仿真试验初始化阶段下发给各网络仿真成员，网络仿真成员解析业务想定文件，根据想定的要求产生业务流量生成业务数据包。

（3）试验规划模块

试验规划模块主要负责：根据试验的输入条件完成试验方案的生成，确定试验的类型、规模、节点组成、网络结构、试验内容和流程、以及相关系统的试验参数。试验规划包括如下几个方面的内容：

- 试验的组织：根据仿真试验的目的和任务，确定参加仿真试验子系统（参试节点）的个数和种类；
- 系统参数配置：完成时间同步策略、控制事件调度策略、状态监控、异常处理等参数的配置；

- 试验参数配置：确定本次试验的仿真网络拓扑场景、业务流量想定、通信协议参数的配置。

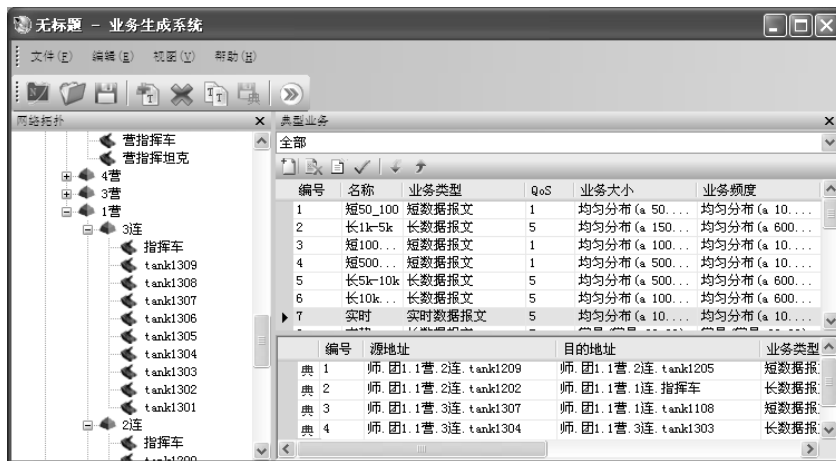


图 8.6 业务想定生成软件主界面

(4) 试验数据管理模块

试验数据管理模块负责对整个试验流程中所产生的各种数据进行维护和管理。它将一次试验的输入、规划预案、运行流程记录、状态监视记录、采集的试验数据、以及分析结果进行集中管理，形成一套完整的试验方案，便于用户全景式地了解整个试验的情况，并为以后再次进行试验提供数据基础。数据管理模块提供对试验方案的分类存储、查询检索、浏览显示、修改、删除以及导入导出等功能。其具体管理内容包括：

- 试验规划预案管理：与试验规划模块相结合，维护管理每次试验的试验输入数据和规划生成预案，并可以将规划预案形成为模版，以便于其他同类型试验的规划；
- 试验运行信息管理：与试验控制运行控制模块和状态监控模型相结合，记录维护试验过程中的流程记录、运行状态等信息，形成试验运行日志记录，便于用户了解试验的具体运行情况；
- 试验结果管理：与评估系统相结合，维护管理每次试验的分析结果。

(5) 试验初始化模块

试验初始化模块负责试验规划的下发，各参试子系统初始化，其具体功能包括：

- 试验规划下发：负责将仿真网络场景、业务流量文件、协议参数配置文件下发给网络仿真子系统；
- 节点配置：根据规划的系统参数配置，对各个参试的子系统进行配置，完成试验运行的准备工作。

（6）试验运行控制模块

试验运行控制模块负责对试验运行进程的控制和管理，提供试验运行的总体控制的功能，并完成分布式试验环境下不同节点间的协同试验。其具体功能包括：

- 试验运行控制：负责试验运行的总体控制，提供对整个试验系统和单个试验节点启动、暂停、恢复、终止试验的功能；
- 试验同步控制：协同试验节点间的运行流程，特别是实物与仿真节点之间的同步控制，保证试验的同步推进；
- 试验运行配置：负责试验运行过程中对试验流程、参数的调整与配置，提供用户对试验运行流程的干预能力。

（7）试验状态监控模块

试验状态监控模块负责对系统中所有试验节点和试验系统运行状态的实时监控，为用户提供实时、直观、明晰的图形化状态显示，并为试验运行控制模块的控制调度提供依据。其具体功能包括：

- 试验运行状态监控：实时监控各个节点试验流程的推进情况，便于用户了解试验的实时运行状态；
- 系统运行状态监控：实时监控各个试验节点上试验系统的工作状态、行为模式、通信流量等状态信息，便于用户及时了解整个试验系统的工作状况。

（8）时间同步模块

时间同步模块负责整个系统中所有试验节点系统时钟的同步。节点时间同步是进行分布式试验控制的基础，只有在时间同步的前提下，才能够保证独立推进试验进程的节点之间协同工作。试验控制与管理系统中采用网络时钟同步机制，根据试验规模，部署一个时钟同步服务器，试验节点通过网络实现与同步服务器之间的时间同步。

图 8.7 所示为仿真想定与主控软件主界面，主界面视图分四个区：试验视图区、监控视图区、日志区和仿真结果视图区。试验视图区以目录树的形式配置和显示本次试验的试验时间、仿真场景设置、仿真结果目录；监控视图区以进度条的形式动态显示本次试验的总进度，仿真时间、物理时间、以及参与试验的各个成员状态及网络状态；日志视图区记录本次试验的重要事件；仿真结果视图区将本次试验收集的仿真结果以图形曲线的形式显示出来。

3. 接口关系

仿真主控采用分层集中控制的方式，仿真主控能够接受试验控制与管理系统的想定文件。仿真主控上部署监控服务、监控代理部署于受控的半实物接口和网络仿真的各个仿真成员上，实现远程集中的监控。主要接口关系（见图 8.8）如下：

（1）仿真主控与试验控制与管理系统的关系。仿真主控接收来自试验控制管理系统的作战想定的结果文件，根据作战想定进行仿真想定（包括网络场景想定和业务想

定)，并将仿真想定结果存储到想定数据库。

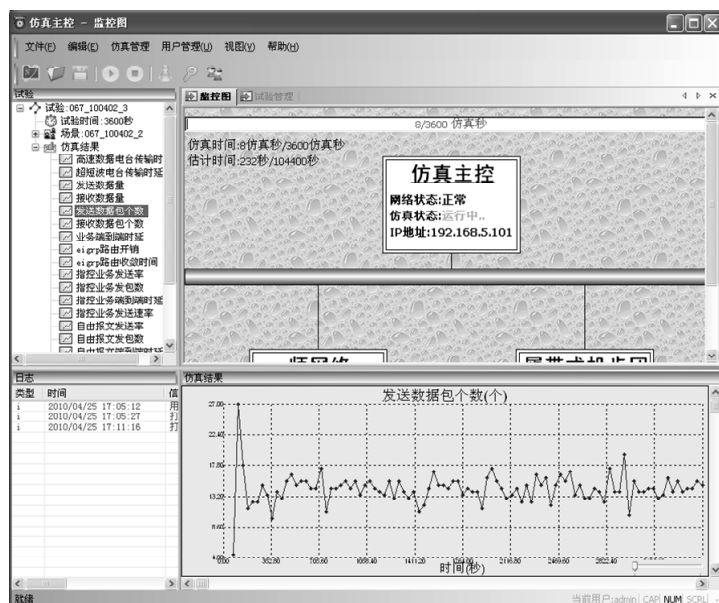


图 8.7 仿真主控软件主界面

(2) 仿真主控与网络仿真的关系。仿真主控在仿真试验准备阶段将所需的仿真想定以文件的形式下发给网络仿真；在仿真试验运行阶段，仿真主控在仿真试验中对网络仿真子系统发送控制指令，而网络仿真子系统定时上报自己的状态；在仿真试验结束阶段，仿真主控接收来自网络仿真子系统仿真结果，并进行汇总处理后存入数据库。

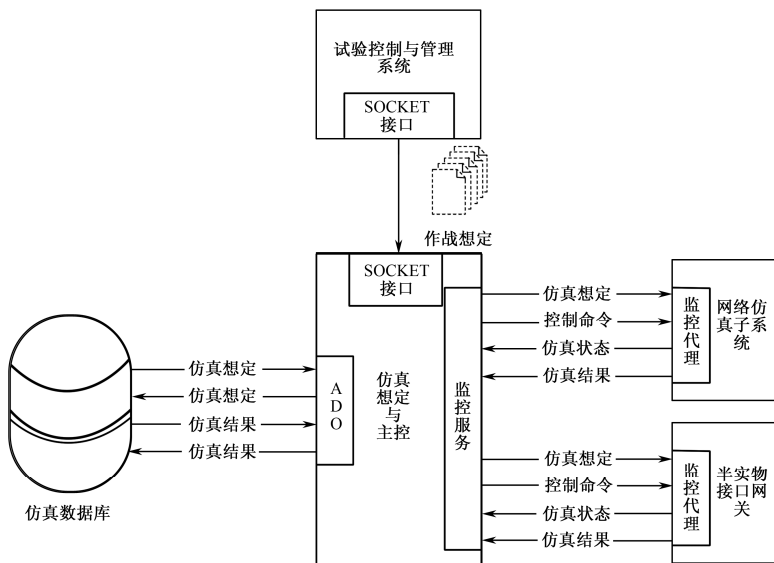


图 8.8 仿真想定与主控接口设计

(3) 仿真主控与半实物接口网关的关系。仿真主控在仿真试验准备阶段将所需的仿真想定以文件的形式下发给半实物接口网关，半实物接口网关根据想定文件进行参数设置；在仿真试验运行阶段，仿真主控在仿真试验中对半实物接口网关发送控制指令，而半实物接口网关定时上报自己的状态；在仿真试验结束阶段，仿真主控接收来自半实物接口网关采集的测试结果，并进行汇总处理后存入数据库。

(4) 仿真主控与仿真数据库的关系。仿真试验准备阶段，仿真主控将生成的仿真想定存入仿真数据库，在仿真结束时，将仿真试验结果存入仿真数据库。

4. 处理流程

仿真试验控制主要包括试验规划和试验控制。仿真规划的过程是在试验准备阶段来完成的，当完成规划后，各个参试的子系统将状态通知仿真主控可以开始进行仿真。如图 8.9 所示。

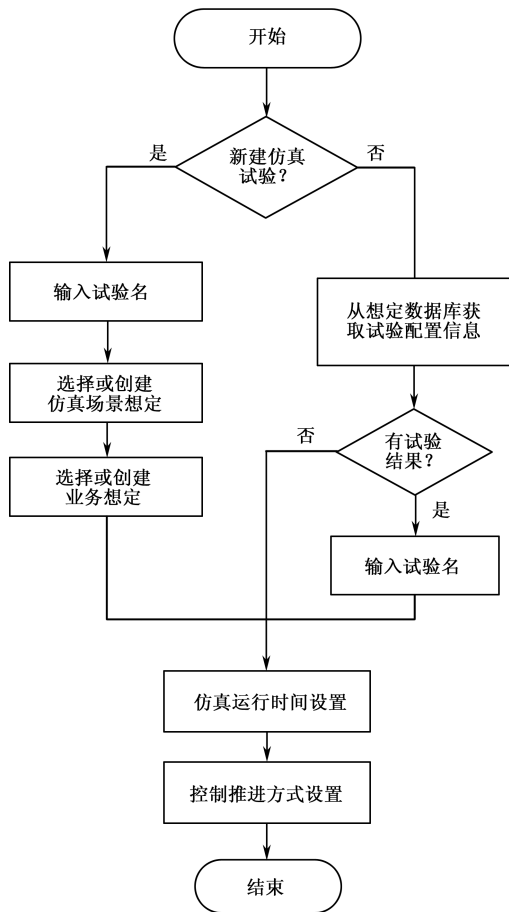


图 8.9 试验规划流程

仿真试验规划生成了大量的试验方案，且每个试验方案需要运行多次，总的仿真运行次数将很多，因此，试验进程监控是对多次仿真运行的监视与控制。一次仿真运行后，需要加载相应的试验方案并重新启动仿真成员才能进行下一次的仿真运行，传统的做法是通过人工操作来完成这个环节的工作，但是其效率很低。所以，可以通过仿真主控系统来完成试验方案的自动加载和仿真成员的自动启动，有利于提高整个试验进程监控过程的自动化水平。仿真试验进程监控的流程如图 8.10 所示。

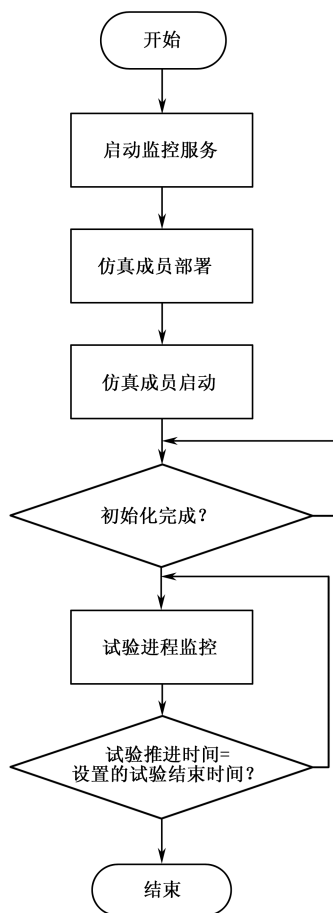


图 8.10 试验监控流程

① 启动监控服务，仿真主控的监控功能由监控服务完成，为了在仿真试验运行过程中对整个试验进程进行监控，必须在仿真运行之前创建和启动监控服务。具体可描述为：首先仿真主控启动监控服务，然后部署在各个网络仿真计算机上的监控代理会自动寻找和加入到监控服务，这样，仿真主控就可通过监控总线发送指令或下发文件给各参试的仿真计算机。

② 仿真成员部署，这一步是根据试验规划文件，把各个仿真场景以及仿真参数部署

到相应的仿真计算机上。部署的过程是仿真主控通过监控总线自动将试验规划文件下发给相应的网络仿真计算机。

③ 仿真成员启动，各个网络仿真计算机收到试验规划文件后，进行试验配置，建立相应的网络仿真场景，加载相应试验规划预案。这一切准备就绪后向仿真主控发送初始化完成的状态信息。

④ 试验进程监控，当仿真主控确认所有的参试仿真计算机完成了初始化，即进程仿真试验推进，在这个过程中仿真监控服务接收各参试仿真计算机的定时状态上报信息，进行对试验全过程的监视与控制。

⑤ 仿真结束，当仿真试验推进到仿真试验结束时间的时候，仿真主控结束仿真试验开始仿真数据的汇总和处理，并存入仿真数据库。

8.2.3 网络仿真

1. 主要功能

战术通信分布式半实物仿真系统中，网络仿真子系统的功能就是以战术通信系统为仿真对象，根据仿真的目的和任务，对战术通信系统的通信协议和系统体系进行相应仿真粒度的抽象和仿真建模。由于战术通信系统的规模比较大，如一个师规模的通信网络往往多达几千个通信节点，通过单一的计算机仿真难以完成大规模的高精粒度的仿真，通常会采用分布式仿真的方法来实现。因而联邦成员的划分是需要重点关注的问题，战术通信分布式仿真的联邦成员划分原则需遵循将相对独立的实体化为一个联邦成员，使得联邦成员间需要的交互信息尽量少。而战术通信系统存在大量的无线通信手段和高机动性的特点，同时考虑作战情况下的作战部署是多变的，为了适应这种需要，考虑将每一个作战相对独立的单元作为一个联邦成员，因此一个作战团或几个作战团（可根据作战团的组织应用关系的紧密程度）可能作为一个联邦成员。但是，无论以上哪个方面作为考虑的侧重点，无线信道模拟应必须作为一个联邦成员，加入到计算机仿真系统中。

图 8.11 所示给出了一个师级规模的网络仿真的联邦成员划分例子，图中将师指挥所及相对固定的通信单元作为一个联邦成员，而将相对独立的作战团划分为一个个联邦行成员，也可以将一个作战团或几个作战团（可根据作战团的组织应用的关系紧密程度化为一个联邦成员）作为一个联邦成员。图中，每一个联邦仿真成员都有一个 RTI 的接口，通过 RTI 接口接入分布式仿真环境中。当定义好联邦成员的交互信息内容和格式后，联邦成员可以根据实际仿真对象（网络实际作战运用）灵活划分，遵循的原则就是联邦成员相对独立，关联性少，以减少联邦成员之间信息量的交互。

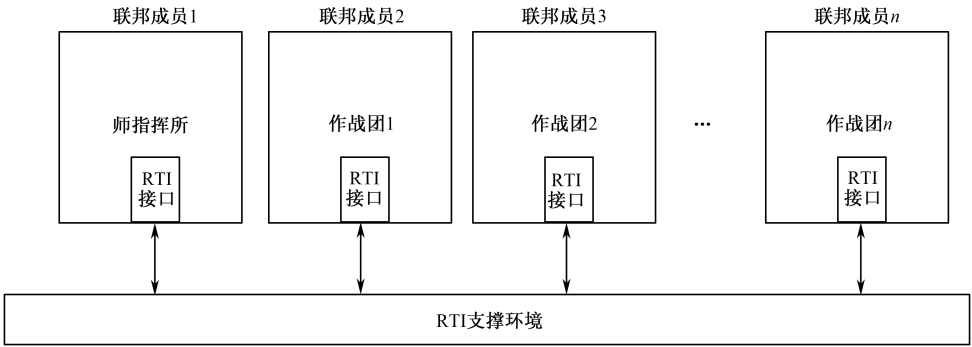


图 8.11 战术通信仿真联邦成员划分示例

2. 结构组成

网络仿真子系统以网络仿真模型为核心，按照仿真想定所需的仿真场景进行仿真运行，采集仿真结果。网络仿真子系统的结构组成如图 8.12 所示。

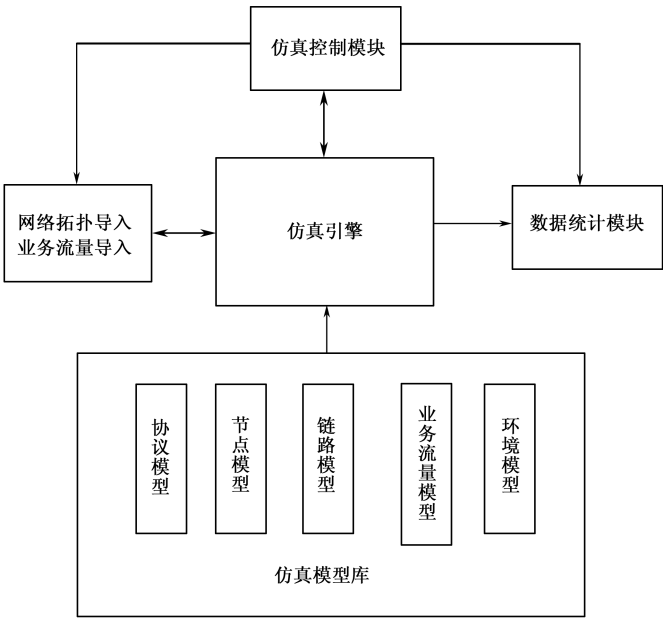


图 8.12 网络仿真子系统的结构组成

网络仿真子系统主要包括以下基本模块：

① 仿真控制模块：它的主要功能是接收仿真主控的命令，并根据不同的命令对网络拓扑导入模块以及仿真引擎和数据统计模块进行控制，包括仿真初始化、仿真启动运行、仿真停止、结果收集等操作。此外，仿真控制模块作为 HLA 接口，完成仿真协同控制以及仿真成员间信息交互的功能。

② 网络拓扑生成与业务流量导入模块：它根据仿真主控中业务想定软件生成的业务流量数据文件以及网络规划的网络拓扑数据文件，完成仿真网络拓扑的生成、各种业务流量的导入以及仿真执行中所需各种参数的设置，并启动仿真引擎，开始网络仿真的执行。

③ 数据统计模块：完成网络仿真子系统中数据的采集和收集以及根据需要实时上报的功能，在仿真结束后，由仿真控制模块将本地仿真统计结果汇总到仿真数据库中。

④ 仿真引擎：仿真引擎是指采用的仿真建模工具内核，它组织仿真模型完成仿真运行，在分布式仿真中仿真引擎受仿真控制模块的控制。

⑤ 仿真模型库：此模块提供战术通信仿真系统运行时所需的各种网络路由协议模型、节点模型、链路模型和业务流模型。仿真模型库的开发是整个通用仿真平台开发的重点，这些仿真模型的可信度和逼真程度将直接决定网络规划与优化后形成的网络应用方案的可信度。关于仿真模型的设计将在第 8.3 节中进行详述。

3. 接口关系

网络仿真子系统是由多个仿真联邦成员构成同时还可以通过半实物接口网关接入实装网络实现半实物仿真，此外，网络仿真子系统还需接受仿真主控的监控和管理。其主要接口关系如图 8.13 所示。

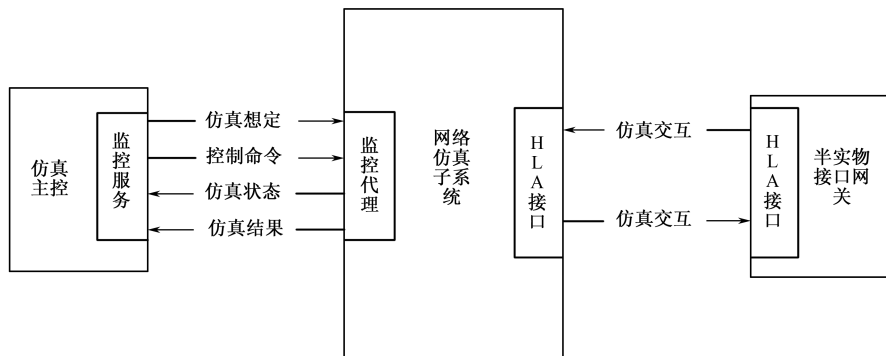


图 8.13 网络仿真的接口设计

通过 RTI 可以将多个网络仿真互连成为一体的无缝联合战术通信系统网络。每个网络仿真联邦成员都是一个单机仿真，并且具有一个 HLA 接口模块。在仿真运行过程中，通过 HLA 接口可以将网络仿真作为联邦成员加入到整个仿真联邦中。

基于 OPNET 构建的网络仿真 HLA 接口主要由以下一些单元组成：

① HLA 处理节点：该模块在网络仿真内部，它负责网络仿真内部与 RTI 接口的无缝连接，实现信息的互通，以及仿真运行的推进。其具体功能如下：

- 基于联邦时间来控制网络仿真时间的推移；

- 在 HLA 对象与网络仿真单元之间进行映射；
- 处理 HLA 与网络对象属性之间的名称转换，并产生相应的属性更新；
- 接收 HLA 交互数据，并转换成相应网络仿真数据包，并发送到相应的网络仿真进程模块；
- 将网络仿真的仿真内部的数据包发送给其他联邦成员。

② SOM (Simulation Object Model, 仿真对象模型) 文件，确定本联邦成员的 HLA 接口。

③ 类映射文件 (Class Mapping File)，该文件描述了仿真分组与 HLA 交互类实例、仿真节点与 HLA 对象类实例在仿真过程中建立起自动的对应关系，如联邦对象模型对象类与仿真对象类型映射；联邦对象模型的类属性与 OPNET 对象属性；联邦对象模型的交互信息与仿真数据包映射；联邦对象模型的参数与仿真数据包域的映射。

④ 所有联邦成员之间共享的 fed 文件 (FED, Federation Execution Data)，该文件是所有联邦成员之间为互操作而达成的协议，记录了在仿真运行期间所有参与交互的对象类、交互类及其属性、参数。

战术通信系统仿真的 map 文件格式，HLA 实体与 OPNET 实体的映射关系如表 8-4 所示。

表 8-4 HLA 实体与 OPNET 实体的映射关系

HLA 实体		OPNET 实体	
Interaction	Parameter	Packet	Packet field
GENERATE 联邦成员的名字	INDEX_EVENT	generate	index_event
	TYPE		type
	NAME		name
	SIZE_BYTE		size_byte
	SOURCE		source
	DESTINATION		destination
	START_TIME		start_time
	END_TIME		end_time
	QOS		qos
	NODE_NUMBER		node_number
	NODE_LIST		node_list
RESULT	INDEX_EVENT	result	index_event
	APP_INFO		app_info
	SEND_NET_NAME		send_net_name
	DELAY		delay

续表

HLA 实体		OPNET 实体	
Interaction	Parameter	Packet	Packet field
PUB_NETWORK	NETNAME	pub_network	netname
	NODENAME		nodename
	NET_CON_ACT		net_con_act
	NET_CON_DUR		net_con_dur
	TRAFFIC_RECEIVED		traffic_received
	TRAFFIC_SENT		traffic_sent
PUB_MAC	NETNAME	pub_mac	netname
	NODENAME		nodename
	DATA_ACCESS_DELAY		data_access_delay
	PACKET_COLLISION		packet_collision
	PACKET_COLLISION_PER_SEC		packet_collision_per_sec
	VOICE_ACCESS_DELAY		voice_access_delay
PUB_ROUTING	NETNAME	pub_routing	netname
	NET_SEG		net_seg
	NET_SEG_LIST		net_seg_list
	NODE_IP_NUM		node_ip_num
	NODE_IP_LIST		node_ip_list
PUB_MOVING	NETNAME	pub_moving	netname
	NODENAME		nodename
	START_BEARING		start_bearing
	END_BEARING		end_bearing
	MOVE_SPEED		move_speed
PUB_PATHLOSS	REQUIR	pub_pathloss	requir
	REPLY		reply
	TX_NAME		tx_name
	RX_NAME		rx_name
	PATHLOSS_VALUE		Pathloss_value

图 8.14 显示了一个联邦仿真的拓扑以及 OPNET 与联邦之间的事件流交互。仿真可以是静态的（利用 op_mksim 命令）或者是动态的（利用 op_rumsim 命令）。

- ① OPNET 仿真网络中需要与 RTI 交互的事件流传输到 HLA 接口节点；
- ② HLA 接口节点使用类映射文件将事件传输到联邦 RTI，RTI 使用.fed 文件接收事件；

- ③ RTI 将 HLA 事件流从联邦传输到 HLA 接口节点；
- ④ HLA 接口节点使用类映射文件接收事件并传输到 OPNET 仿真网络中的其他节点。

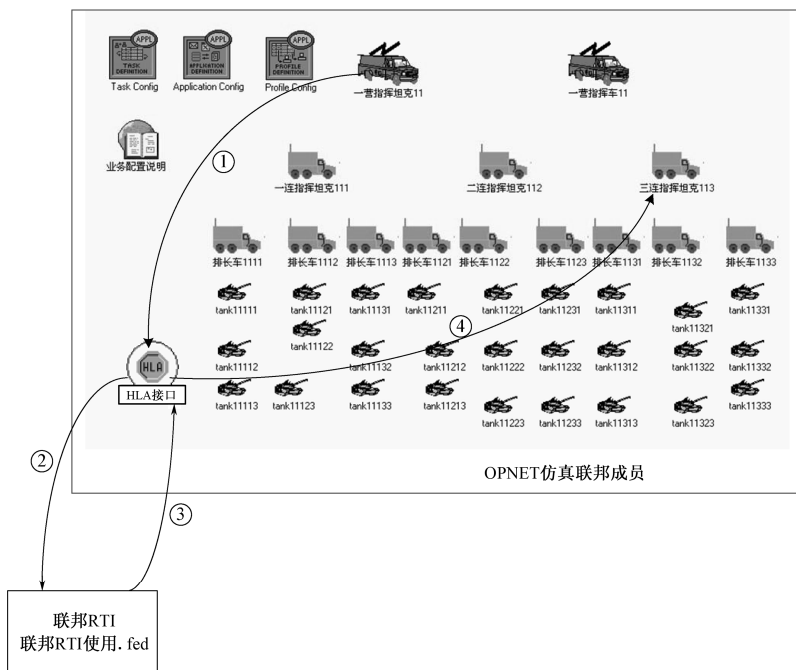


图 8.14 网络仿真联邦交互处理流程

4. 处理流程

网络仿真系统主要完成对战术通信系统的网络协议、网络设备、网络结构和组织应用的建模，并使用 HLA 分布式半实物仿真体系结构将这些联邦成员互连，模拟战术通信网的工作过程，并收集和存储结果数据。

如图 8.15 所示，通信系统网络仿真系统工作过程主要有以下几步：

- ① 仿真初始化：仿真主控规划仿真运行参数，然后下发到各个网络仿真联邦成员，由网络仿真联邦成员初始化仿真网络，并加载相应的仿真运行参数。
- ② 仿真运行：在完成仿真系统的初始化后，由仿真想定与主控启动仿真系统。运行过程，网络仿真不断地产生仿真事件，相互之间交换业务数据，推进仿真运行。并且，网络仿真将收集的统计结果数据存储，将当前自身运行状态上报仿真主控。
- ③ 仿真结束：仿真结束后，网络仿真联邦成员将收集的统计数据提交给评估系统，由评估系统完成数据的处理和分析。

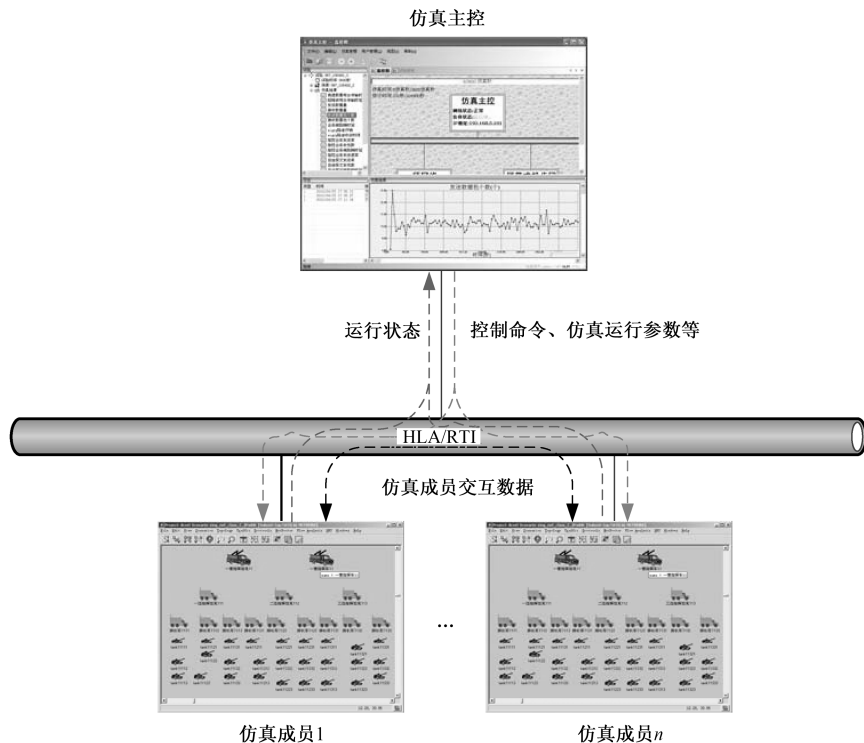


图 8.15 网络仿真系统工作过程

系统工作流程如图 8.16 所示。

8.2.4 仿真数据库

1. 主要功能

仿真数据库主要用于存储仿真试验的整个仿真预案的编辑结果、仿真试验过程的关键参数、属性等动态数据、仿真试验的结果数据以及效能评估分析结果数据。

在仿真试验准备阶段，用户通过仿真主控的人机交互界面进行想定编辑、配置业务流、定制统计结果。完成仿真前的编辑后，把仿真预案存储到仿真数据库中。这样，用户在进行下一次仿真的时候，可以通过调用仿真数据库中保存的仿真预案直接在此基础上进行仿真，而不需要对仿真场景进行重新规划，只需要为仿真预案中的每个子场景指定相应的仿真主机，配置各个成员的仿真参数。

在仿真试验运行阶段，仿真数据库主要完成对仿真运行数据的采集和处理，保存仿真成员的运行状态，仿真系统中各个对象的属性，以及之间的交互，如节点的运行轨迹、节点之间的通信状况等。在仿真结束后，通过调用仿真数据库中保存的仿真状态信

息来进行仿真的重演，而无须重新运行仿真。

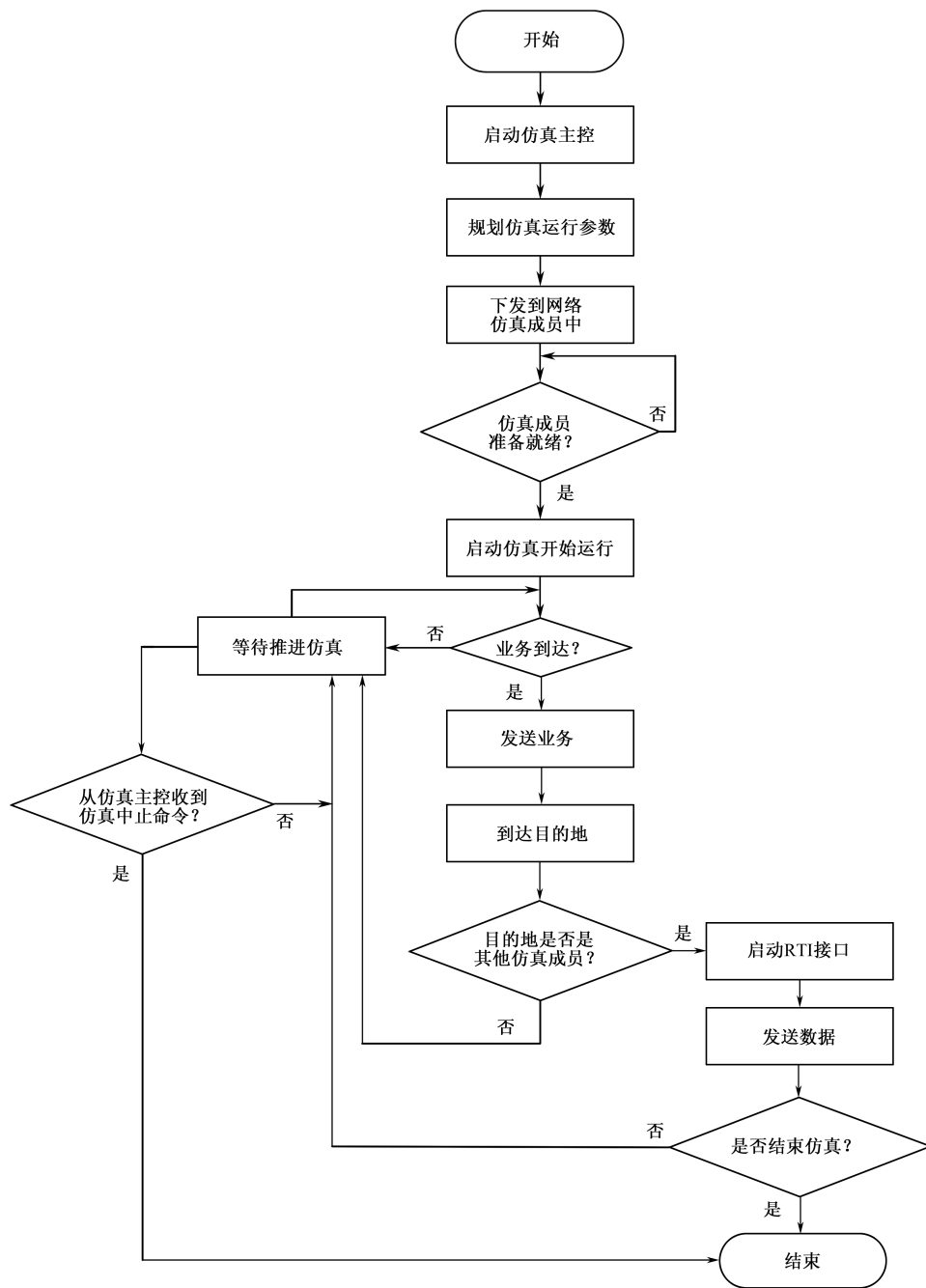


图 8.16 网络仿真系统工作流程

在仿真试验结束阶段，主控平台把单个仿真成员收集到的仿真统计结果进行合并处理后，把仿真系统的完整统计结果数据写入仿真数据库中。用户可以日后通过主控平台来调用之前的仿真结果，进行分析和比较。

此外，仿真数据库还存储了用于评估所需的指标数据、专家判定数据以及效能评估后的评估结果。

2. 结构组成

根据仿真数据库在系统中的作用，划分为三大数据库模块，分别是想定数据库、仿真库和评估库，如图 8.17 所示。

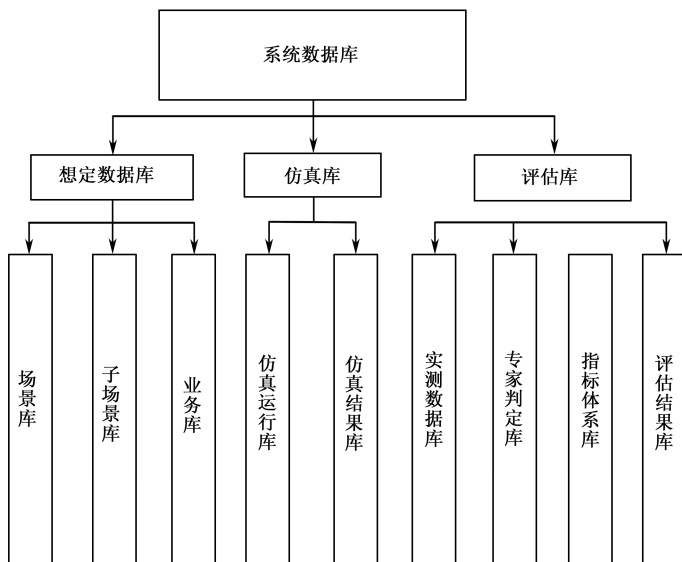


图 8.17 功能划分

(1) 想定数据库

想定数据库用于存储仿真场景信息、分布于各计算机运行的子场景信息以及本次仿真试验运行的业务信息。场景数据库和仿真子场景库主要用于存储仿真试验中仿真网络场景文件、试验设置参数信息，如试验运行时间、试验控制推进方式等；业务数据库主要存储业务想定文件。想定数据库表结构如表 8-5～表 8-7 所示。

表 8-5 场景库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
ID	NUMBER	10	场景的唯一标示	主键
NAME	STRING	100	场景名称	

续表

字段名	数据类型	长度	作用	备注
NOTE	STRING	200	场景说明	
CAPTION	STRING	100	场景标签	
CREATE_TIME	STRING	20	场景创建时间	

表 8-6 子场景库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
SCENE_ID	NUMBER	10	场景编号	外键
ID	NUMBER	10	场景的唯一标示	
NAME	STRING	100	场景名称	
NOTE	STRING	200	场景说明	
CAPTION	STRING	100	场景标签	
CREATE_TIME	STRING	20	场景创建时间	

表 8-7 业务库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
SCENE_ID	NUMBER	10	场景编号	外键
ID	NUMBER	10	业务的唯一标示	
NAME	STRING	100	业务名称	
NOTE	STRING	200	业务说明	
CREATE_TIME	STRING	20	业务创建时间	

(2) 仿真库

仿真数据库存储一次仿真试验运行的仿真运行信息，包括仿真场景和仿真业务，以及本次仿真试验运行的仿真结果信息。仿真运行库存储了本次试验中，各仿真联邦成员的网络场景和业务想定信息。仿真结果库存储了本次仿真试验中，收集到的战术通信系统的网络性能参数，这些参数主要包括：网络初始化建立时间、路由收敛时间、网络延迟、吞吐量、网络负载、碰撞概率等。仿真库的表结构如表 8-8 和表 8-9 所示。

表 8-8 仿真运行库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
SCENE_ID	NUMBER	10	场景编号	
TRAFFIC_ID	NUMBER	10	业务编号	
ID	NUMBER	10	业务的唯一标示	主键
NAME	STRING	100	业务名称	

续表

字段名	数据类型	长度	作用	备注
NOTE	STRING	200	业务说明	
CREATE_TIME	STRING	20	业务创建时间	
SimTime	NUMBER	10	业务仿真运行时间	

表 8-9 仿真结果库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
TES_ID	NUMBER	10	仿真试验编号	外键
TIME	NUMBER	10	仿真时间	
VALUE	NUMBER	10	仿真结果	
TYPE	STRING	100	统计量名称	
SCOPE	NUMBER	10	统计范围，节点或全局	
NODE_NAME	STRING	100	节点名称	

(3) 评估库

评估库存储一次评估所需的评估指标体系、评估指标数据以及最终的评估结果。由实测数据库、专家判定库、研制指标库和评估结果库构成，分别存储系统联试时试验报告中的结果、专家判定的指标和指标权重数据、研制指标数据、评估结果数据。评估库的表结构如表 8-10 和表 8-11 所示。

表 8-10 评估项目库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
ID	NUMBER	10	评估项目的唯一标示	主键
NAME	STRING	100	评估项目	
NOTE	STRING	200	评估项目说明	
TYPE	NUMBER	10	项目类型，评估项目、专家数据库、测试数据	
CREATE_TIME	STRING	20	场景创建时间	

表 8-11 评估结果库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
VALUE_ID	NUMBER	10	指标 ID	外键
VALUE	NUMBER	10	评估值	
SUGESTION	STRING	100	专家意见	
ARITH_NAME	STRING	20	算法名称	

实测数据和专家数据的存储表格式都使用表 8-12 所示的表格式，通过 VALUE_TYPE 字段标识何种类型数据。

表 8-12 指标体系库表格式

字段名	数据类型	长度	作用	备注
EVALUTE_ID	NUMBER	10	评估项目 ID	外键
ID	NUMBER	10	唯一 ID	主键
PARENT_ID	NUMBER	10	父节点 ID	
NAME	STRING	50	指标名称	
VALUE	NUMBER	10	指标值	
MAX_VALUE	NUMBER	10	最大指标值	
MIN_VALUE	NUMBER	10	最小指标值	
HEAVY	NUMBER	10	权重值	
MAX_HEAVY	NUMBER	10	最大权重值	
MIN_HEAVY	NUMBER	10	最小权重值	
VALUE_TYPE	NUMBER	10	数据类型	

3. 接口关系

仿真数据库主要用于存储仿真试验数据以及评估数据，因此仿真数据和仿真主控、效能评估存在关系，它们通过 ADO 接口对仿真数据库进行操作，如图 8.18 所示。

8.2.5 效能评估

1. 主要功能

效能评估能够利用仿真试验数据及实测数据，对战术通信系统效能进行综合评估。具体功能如下：

- ① 建立指标体系：建立完备的战术通信系统综合评估指标体系。
- ② 系统评估：并能够根据仿真试验以及实际测试试验数据，通过评估算法进行计算，最终给出战术通信系统的综合评估结论。
- ③ 系统优化：提供有效的测试和评估手段，评估战术通信在不同应用下的网络总体性能，分析各分系统与设备对总体性能的影响，验证和优化系统的组织运用方式。

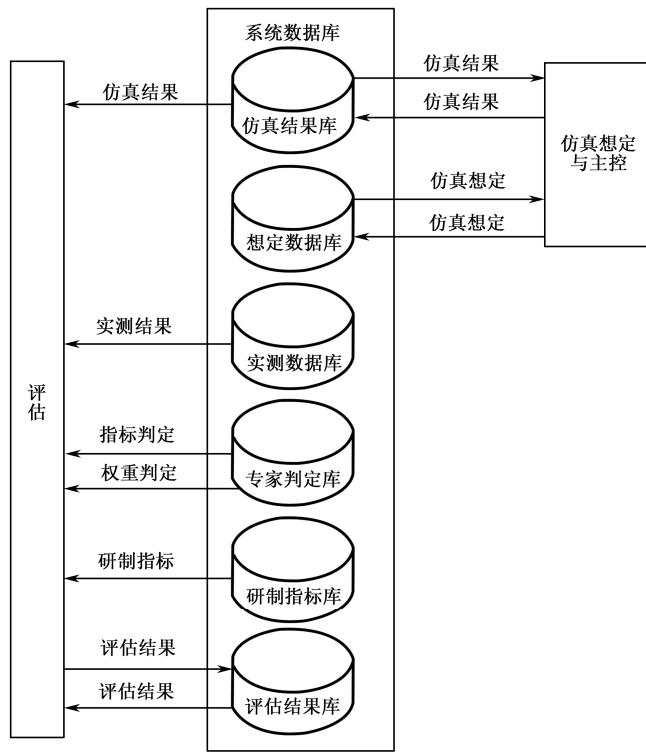


图 8.18 仿真数据库与外部子系统的接口关系

2. 结构组成

根据效能评估在系统中的作用，划分为三大功能模块，分别是数据输入、评估计算和数据输出，如图 8.19 所示。

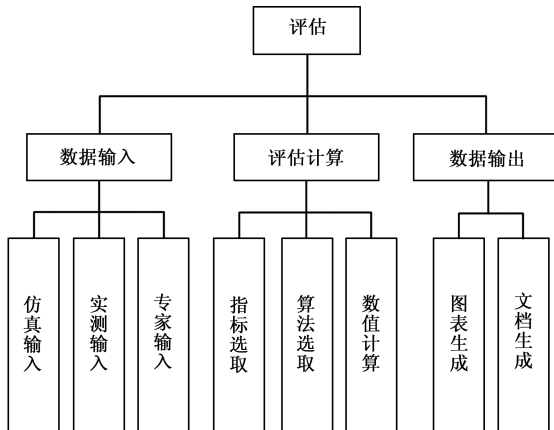


图 8.19 效能评估系统的结构组成

(1) 数据输入

数据输入分为仿真输入、实测输入、专家输入三个子功能模块，分别获取网络仿真的仿真结果，战术通信系统联试时试验报告中的实测结果，以及专家判定的指标数据和指标权重数据，完成一次评估的数据输入。

(2) 评估计算

评估计算分为指标选取、算法选取、数值计算三个子功能模块，分别确定评估指标体系和评估算法，并完成评估计算。

(3) 数据输出

数据输出分为图表生成和文档生成两个子功能模块，实现一次评估结果或对比结果的两种输出方式。

软件结构分为界面层、功能层、通信层，各层分别完成不同的功能，如图 8.20 所示。

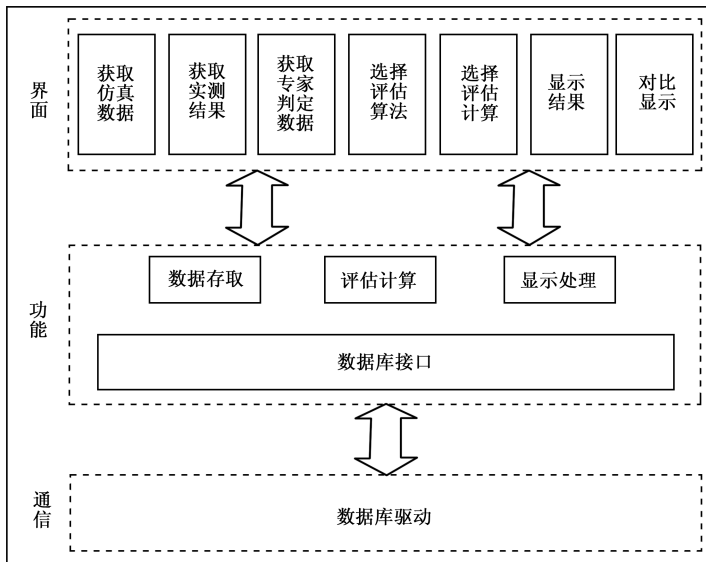


图 8.20 效能评估系统的软件结构

3. 接口关系

效能评估主要与仿真数据库之间存在关系。从仿真结果库中获取仿真结果，从实测数据库中获取实测结果（指战术通信系统联试时试验报告中的结果），从专家判定库中获取专家判定的指标数据和权重数据，完成评估计算后，将评估结果存储到评估结果库中；也可以从研制指标库提取研制指标，或从评估结果库提取已评结果，和本次评估进行对比分析，如图 8.21 所示。

4. 处理流程

评估软件包是评估系统的具体实现，它通过数据库访问的方式获取野外综合测试试验系统、内场测试环境的试验数据，以及仿真系统提供的统计数据文件，调用不同的评估专家系统，对战术通信的系统效能进行综合评估，对评估结果进行存储和输出。

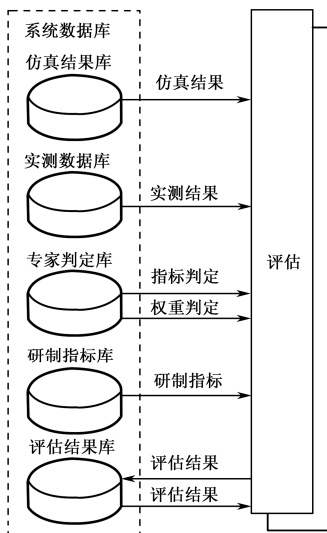


图 8.21 效能评估接口关系

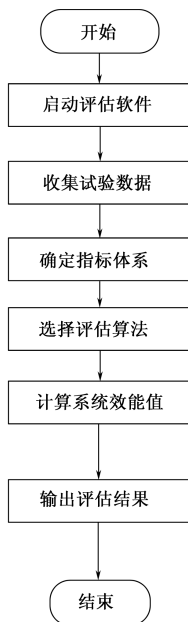


图 8.22 评估系统工作流程

通过收集内场测试环境、野外综合测试试验系统、仿真系统提供的试验数据，仿真系统完成对战术通信系统的综合评估，并输出评估结果。如图 8.22 所示，联合战术通信系统效能评估系统的工作过程主要有以下几步：

① 获取试验数据：收集内场测试环境、野外综合测试试验系统、仿真系统提供的试验数据；

② 分析计算：在获取试验数据的基础上，对试验数据进行分门别类的处理，并根据相应的指标体系结构和评估算法，计算系统效能；

③ 输出结果：以文档、数据、图形等形式输出系统效能值。

8.2.6 半实物接口网关

1. 主要功能

半实物仿真又称为硬件在回路（Hardware In The Loop, HITL）仿真或系统在环（System In The Loop, SITL）。被仿真系统有一部分用与实际系统相同或相近的实物，其他部分则采用计算机仿真形式。半实物仿真是一种将实物与在计算机上实现的仿真模型联接在一起进行实验的技术。在这种实验中，系统的动态特性、静态特性和非线性因素等都能真实地反映出来，因此它是一种更接近实际的仿真实验技术。这种仿真技术广泛用于产品的修改定型、产品改型和出厂检验等方面。

战术通信系统是一个复杂的通信网络，战术通信系统半实物仿真要求将真实的装备构建的网络与计算机仿真中的仿真网络实现数据的交互。利用网络仿真，用户能够测试实装网络设备在各种不同模拟的网络环境中的功能和性能，而无需获得、了解或修改它的内部协议栈。正由于此，半实物仿真可被广泛应用于测试网络协议和设备以及军事培训。

在战术通信分布式半实物仿真系统中，半实物接口网关就是用于将仿真网络与实装网络互连起来实现半实物仿真试验的关键设备。半实物接口网关将仿真网络与实装网络或模拟网络互连起来构建半实物仿真的试验环境。半实物接口网关完成仿真系统与实物系统的接口转换与控制，执行仿真管理与控制的命令，执行仿真时间、事件与信息向实物系统的传递与协调，进行信息格式的转换，与仿真网络交换必要的业务和路由信息，完成双向代理的功能。它一方面对仿真系统提供实物系统、模拟系统的仿真镜像，把实物系统、模拟系统作为仿真系统的一个内部成员，完成与仿真系统一样的功能；另一方面对实物系统、模拟系统提供虚拟网络，使仿真系统所构成的网络对实物系统、模拟系统就像一个真实的网络一样。接口控制还执行必要的数据采集等功能，以采集实物系统、模拟系统的各种性能参数。

2. 结构组成

战术通信分布式半实物仿真系统基于 HLA 分布式仿真架构，实现分布式仿真和半实物仿真相结合。半实物接口网关考虑以仿真联邦成员的形式加入到分布式仿真中。通过 HLA 接口将数据传送到运行支撑环境（Run-Time Infrastructure, RTI）上，利用 RTI 自身的机制完成同其他仿真环境或者外部设备的信息交互。

半实物接口网关需支持多种接口，能够与实装网络的通信设备相连，主要完成实物包的截获和过滤、实物包和仿真虚拟包的相互转换、仿真推进管理、网络性能统计等功能。其结构组成如图 8.23 所示。

(1) HLA 接口

HLA 接口模块能够非常方便地将实物网络接入现有的 HLA 仿真环境中, 实现仿真网络与实装网络之间的互连互通互操作, 进行半实物仿真。HLA 接口的主要作用是: 联邦开始时, 管理半实物接口网关联邦成员的初始化; 成员仿真时间推进时, 控制基于联邦时间的仿真时间; 成员创建以及 HLA 数据接收和发送。HLA 接口还接收控制管理与同步模块的控制和管理, 数据采集与统计模块通过 HLA 接口获得来自仿真网络的仿真结果。

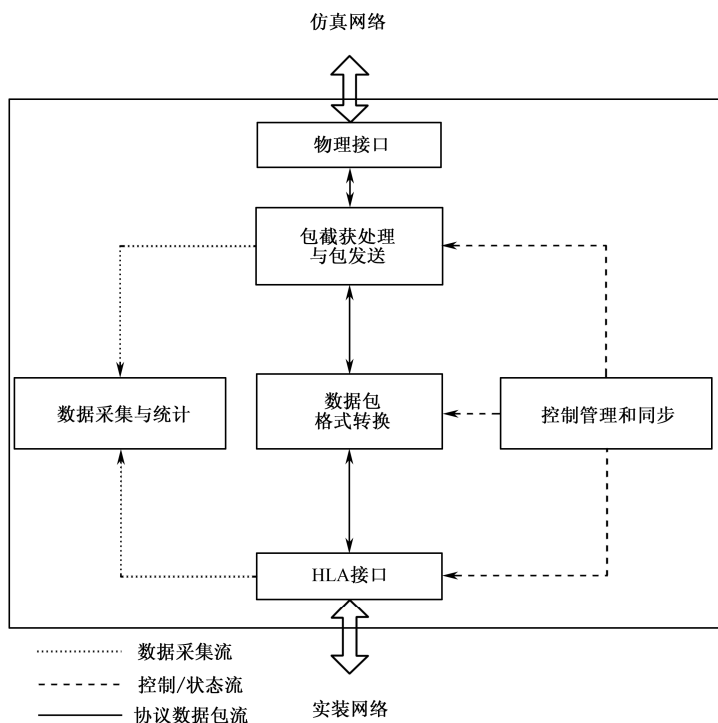


图 8.23 半实物接口网关的结构组成

(2) 数据包格式转换

数据包格式转换模块是仿真网络虚拟包和实装网络真实报文之间转换的桥梁, 它主要实现如下功能:

- 根据实际数据包的内容, 将数据包映射到 HLA 交互, 通过 HLA 处理模块发送给仿真节点;
- 根据目的节点和路由信息, 将 HLA 交互映射到实际数据包, 通过数据包发送模块发送给实物节点。

此外, 数据包格式转换模块会进行相关的协议处理, 实现仿真网络和实装网络在协议层次上的互连互通。

数据包格式转换模块收到数据包时,无论它是真实数据包还是仿真包,都首先尝试判断包格式和所属的协议,然后调用相应的翻译函数。当匹配到合适的翻译函数,就对该输入包进行翻译并生成仿真包。由于协议通常是按层嵌套的,所以在包的翻译时也是先进行低层协议的检测和翻译,然后递归地调用其他检测/翻译函数对。数据包转换流程如图 8.24 所示。

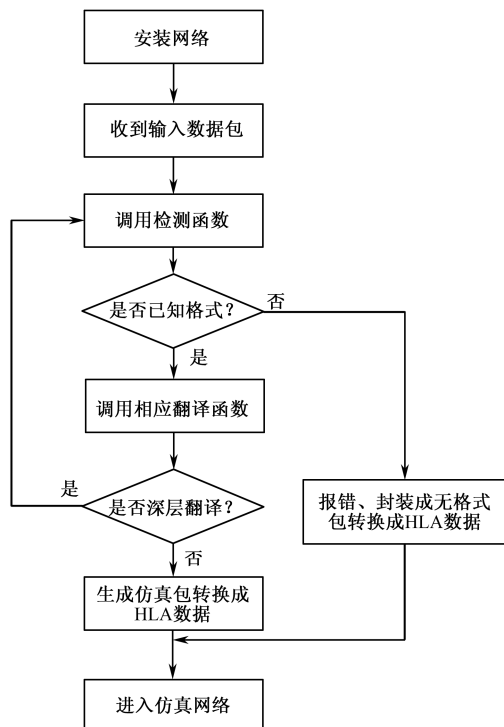


图 8.24 数据包转换流程

OPNET 软件按照 TCP/IP 协议栈模拟了实际节点的结构,其仿真节点具有用有限状态机实现的虚拟的协议栈,各层协议以及仿真设备间用包流连接。当仿真包到达一个模块时,会引发一个流中断,接着协议进程响应中断,处理仿真包结束,然后仿真包被销毁或转发到其他模块。但是仿真包不是比特流,而是使用由域组成的 OPNET 内部特殊的数据类型,而且其数据域通常为空白。因此,OPNET 仿真和真实网络不能直接通信,而必须进行包的转换。由于协议的多样性,对所有协议包都作转换并不实际。而如果转换在传输层进行,则必须对 TCP 和 UDP 包单独处理,相当多的 IP 层协议也不能仿真,而如果在数据链路层进行转换,就必须更改网络驱动程序,而由于多种链路层协议的共存,使得驱动程序与网卡或调制解调器类型对应。而目前 IP 协议则已经是战术通信系统通用的网络层协议,因此将包的转换放在 IP 层,使用 Windows 的 Raw Socket 方面的 API 函数完成包的截获和转发。在截获和转发时,更改 IP 头,完成虚拟

IP 和真实 IP 的映射。

目前，仿真网络数据包和实装网络数据包，其数据包被封装成标准的 IP 报文，一个 IP 数据报由首部和数据两部分组成，首部的前一部分长度是固定的 20 个字节，后一部分的长度则是可变长度，格式如图 8.25 所示。

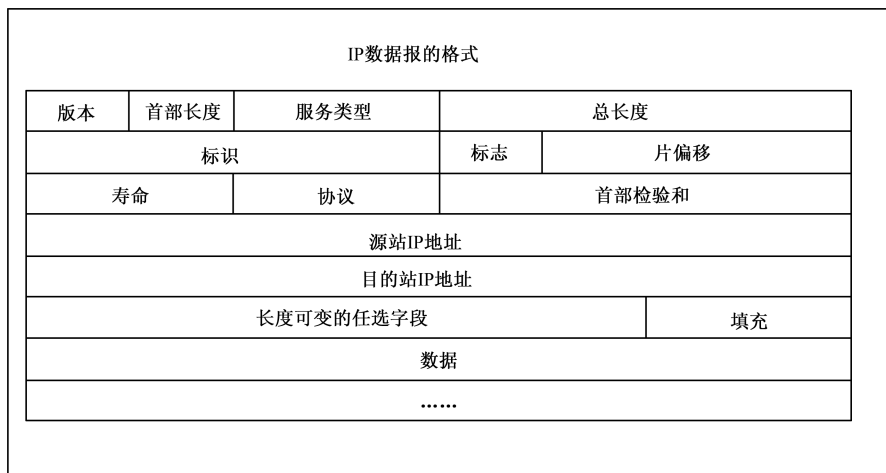


图 8.25 实装网络 IP 报文格式

而在仿真网络 OPNET 中，使用的是 ip_dgram_v4 类型的虚拟报文，它的格式如图 8.26 所示。

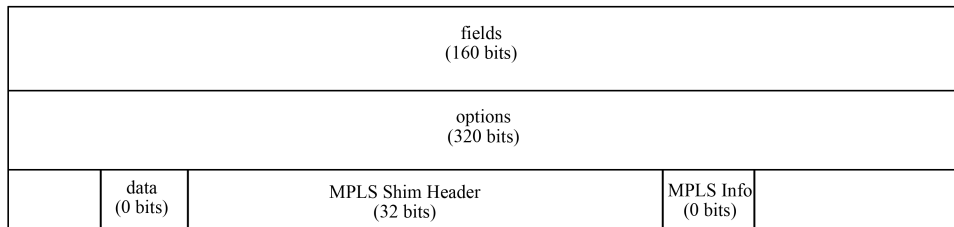


图 8.26 仿真网络中虚拟 IP 报文格式

当数据报由真实设备发送到仿真端时，真实报文 IP 头的相关信息转换成对应的格式存储在 OPNET 报文的“fields”字段，IP 头包含的字段并不是和“fields”里的字段一一对应，抛掉多余的字段，并根据仿真的需要补充 IP 头中没有的字段；真实报文的“数据”字段也需要进行格式解析，并存储在“data”字段。在 OPNET 仿真中，通常由 ICI（接口控制信息）存储报文的其他有效信息，我们在把真实的 IP 报文转换成仿真能识别的报文的同时，也要对应生成附属于该报文的 ICI 信息。同样，当报文由仿真端发向实际设备时，其流程和上面的过程刚好相反。

(3) 包截获处理与包发送

该模块主要完成对实物网络来的数据包의 截获、包处理、包发送。包的截获通过 WINPCAP 技术提供的包截获 API 函数来截获和过滤与实装设备协议相关的数据包。在真实网络环境即 TCP/IP 网络中, 所有往来的信息都被分割成许许多多一定长度的信息包, 信息包的包头中包括 IP 源地址、IP 目标地址、内装协议、TCP/UDP 目标端口、ICMP 消息类型、包的进入接口和出接口等信息。包处理可以检查所有通过的信息包中的包头信息, 并按照用户所设定的过滤规则过滤信息包。包的发送主要将由仿真来的协议数据包封装成以太网包交给网卡驱动发送出去。

半实物接口网关基于 Windows 系统平台开发, 其关键核心技术就是在 Windows 操作系统下实现网络数据包的截获技术。为了直接获取从物理接口来的数据包, 系统采用了 Winpcap 技术。Winpcap 是 UNIX 下的 libpcap 移植到 Windows 下的开源的产物, 工作于物理接口的驱动层, 所以能以很高的效率进行网络操作。Winpcap 提供了捕获原始的数据包、设置 filter, 只捕获自己感兴趣的数据包、方便地把捕获的数据包输出到文件和从文件输入、发送原始的数据包、统计网络流量等功能。

WinPcap 是由伯克利分组捕获库派生而来的分组捕获库, 它是在 Windows 操作平台上来实现对底层包的截取过滤。WinPcap 为用户级的数据包提供了 Windows 下的一个平台。WinPcap 是 BPF 模型和 Libpcap 函数库在 Windows 平台下网络数据包捕获和网络状态分析的一种体系结构, 这个体系结构是由一个核心的包过滤驱动程序, 一个底层的动态链接库 Packet.dll 和一个高层的独立于系统的函数库 LibPcap 组成。底层的包捕获驱动程序实际为一个协议网络驱动程序, 通过对 NDIS 中函数的调用为 Win95、Win98、WinNT 和 Win2000 提供一类似于 UNIX 系统下 Berkeley Packet Filter 的捕获和发送原始数据包的能力。Packet.dll 是对这个 BPF 驱动程序进行访问的 API 接口, 同时它有一套符合 Libpcap 接口 (UNIX 下的捕获函数库) 的函数库。WinPcap 的结构图如图 8.27 所示。

WinPcap 包括三个部分: 第一个模块 NPF (Netgroup Packet Filter), 是一个虚拟设备驱动程序文件。它的功能是过滤数据包, 并把这些数据包原封不动地传给用户态模块, 这个过程中包括了一些操作系统特有的代码。第二个模块 packet.dll 为 Win32 平台提供了一个公共的接口。不同版本的 Windows 系统都有自己的内核模块和用户层模块。Packet.dll 用于解决这些不同。调用 Packet.dll 的程序可以运行在不同版本的 Windows 平台上, 而无需重新编译。第三个模块 Wpcap.dll 是不依赖于操作系统的, 它提供了更加高层、抽象的函数。

Packet.dll 和 Wpcap.dll: Packet.dll 直接映射了内核的调用。Wpcap.dll 提供了更加友好、功能更加强大的函数调用。WinPcap 的优势提供了一套标准的抓包接口, 与 libpcap 兼容, 可使得原来许多 UNIX 平台下的网络分析工具快速移植过来便于开发各种网络分析工具, 充分考虑了各种性能和效率的优化, 包括对于 NPF 内核层次上的过滤器支持,

支持内核态的统计模式，提供了发送数据包的能力。

WinPcap 通过“嗅探”传输介质的方式实现包的捕获，归结起来有以下功能：①包截获：包截获是 NPF 最重要的操作，NPF 位于 NDIS 中间层，可以直接过滤从网卡中接收到数据包，并原封不动地送往用户层应用程序；②数据包转储：利用 NPF 提供的数据包转储功能，不需要用户应用程序的介入，在内核层可以直接寻址文件系统，大大减少了系统调用，提高了转储的效率；③包注入：NPF 除了可以从网络中截获数据包，还可以往网络发送数据包，而且拥有更高的发送效率，适合应用于网络高速流量测试；④网络监测：WinPcap 提供了内核层的监测模块，不需要把数据包送到应用程序就能实现分类统计，统计数据直接来源于适配器驱动程序，这大大节省了内存和处理器资源。

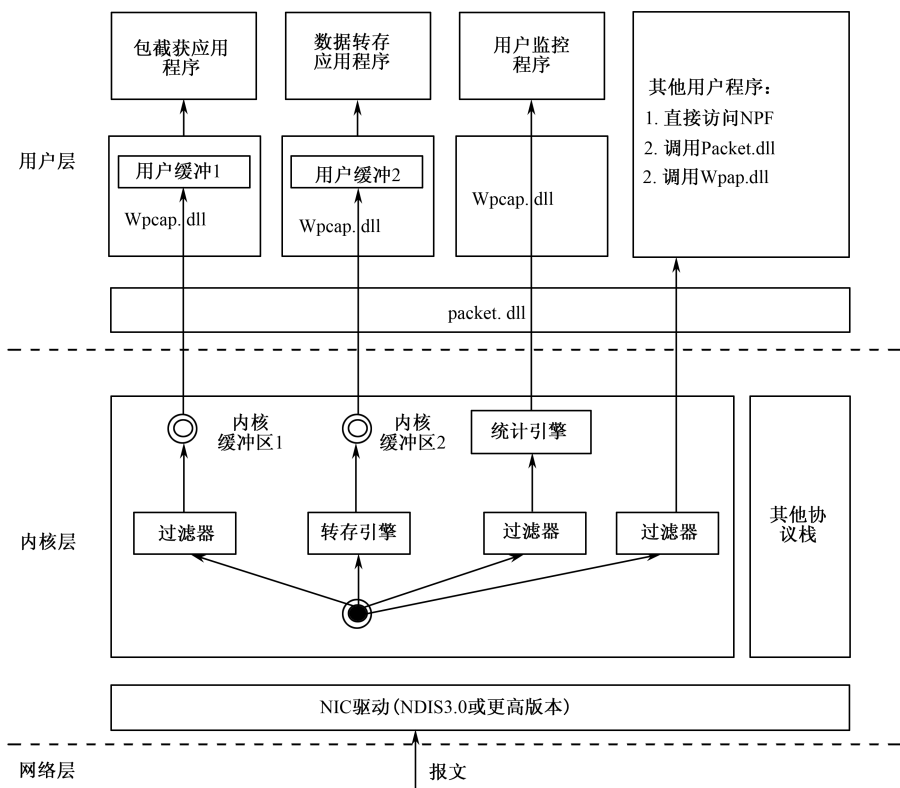


图 8.27 WinPcap 结构

可见，基于 NDIS 中间层的 WinPcap，可以截获完整的帧，或者说可以截获所有流过网卡的封包。在此基础上，可以根据帧头和报头分析协议类型，进而可以实现包的过滤。这种涵盖了从内核态到用户态的三层模块包截获工具，正适合半实物仿真对原始数据包的处理需求，因此半实物接口网关基于 WinPcap 技术进行网络数据包截获和过滤。

包截获的工作流程如下：

- ① 打开网卡，并设为混杂模式。
- ② 回调函数 Network Tap 在得到监听命令后，从网络设备驱动程序处收集数据包，把监听到的数据包负责传送给过滤程序。
- ③ 当 Packet filter 监听到有数据包到达时，NDIS 中间驱动程序首先调用分组驱动程序，该程序将数据传递给每一个参与进程的分组过滤程序。
- ④ 然后由 Packet filter 过滤程序决定哪些数据包应该丢弃，哪些数据包应该接收，是否需要将接收到的数据复制到相应的应用程序。
- ⑤ 通过分组过滤器后，将数据未过滤掉的数据包提交给核心缓冲区。然后等待系统缓冲区满后，再将数据包拷贝到用户缓冲区。监听程序可以直接从用户缓冲区中读取捕获的数据包。
- ⑥ 关闭网卡。

主要实现代码如下：

根据 Windows 分组捕获库 WinPcap 提供的功能首先要初始化两个结构体，一个是适配器的结构体 LpAdapter，另一个是存放接收到的数据包的结构体 RecvPacket。使用 Packet.dll 动态链接库编写源代码：

```
#define MAX__LINK__NAME__LENGTH 64
```

适配器结构：

```
typedef struct __ADAPTER
```

```
{
```

```
HANDLE hFile;
```

```
TCHAR Symboliclink[MAX__LINK__NAME__LENGTH];
```

```
Int NumWrites;
```

```
}ADAPTER , *LPADAPTER;
```

说明：hFile 是一个指向该网络适配器 Handle 的指针，通过它可以对网络适配器进行操作。symboliclink 包含当前打开的网络适配器的名字。

数据包结构：

```
typedef struct _PACKET
```

```
{
```

```
HANDLE hEvent;
```

```
OVERLAPPED OverLapped;
```

```
PVOID Buffer;
```

```
UINT Length;
```

```
PVOID Next;
```

```
UINT ulBytesReceived;
```

```

        BOOLEAN        bloComplete;        //控制接受包的开始和结束
    }

```

数据包捕获实现的主要源代码如下:

① 获得适配器列表:

```

#define        Max__Num__Adapter 10        //获得适配器列表

```

```

char        Adapterlist [Max__Num__Adapter[512]]

```

```

int        i=0

```

```

char        AdapterNames[512], *tempa, *templa;

```

```

ULONG AdapterLength=1024; } PACKET, *LPPACKET;

```

② 获得系统中网络适配器的名字:

```

PacketGetAdapterNames (AdapterNamea, &AdapterLength) ;

```

```

tempa=AdapterNamea;

```

```

templa=Adapternamea;

```

```

while ( (*tempa!=' \0' ) | | (*tempa-1!=' \0' )

```

```

{

```

```

    if ( *tempa=='\0' )

```

```

    {

```

```

        memcpy (AdapterList[i], templa, tempa-templa) ;        //内存数据拷贝

```

```

        templa=tempa+1;

```

```

        i++

```

```

    }

```

```

        tempa++

```

```

}

```

③ 从适配器列表中选择一个默认的 0 号适配器:

```

LPADAPTER lpAdapter

```

```

lpAdapter = PacketOpenAdapter (AdapterList[0]) ;

```

```

if (!lpAdapter | | (lpAdapter->hFile==INVALID__HANDLE__VALUE))

```

```

{

```

```

    dwErrorCode=GetLastError () ;

```

```

    return FALSE;

```

```

}

```

④ 将所选择的适配器 lpAdapter 设置为混杂模式:

```

PacketSetHwFilter (lpAdapter, NDIS_PACKET_TYPE_PROMISCUOUS)

```

⑤ 设置 BPF 内核中包过滤的过滤器的参数。利用这个函数, 以完成对于原始数据包的初始的过滤处理, 如根据其中端口号、IP 地址等:

PacketSetBpf (lpAdapter AdapterObject, structbpf_program*fp)

⑥ 设置缓冲池为 512K 字节:

PacketSetBuff (lpAdapter, 512000);

⑦ 分配一个数据包对象, 并连接已分配的缓冲:

PacketInitPacket (lpPacket, (char*) bufferReceive, 512000);

⑧ 捕获多个数据包。从网卡 lpAdapter 接收数据包, 并将数据包放入 lpPacket 所指向的数据包结构体中, 若接收成功返回 TRUE, 否则返回 FALSE:

PacketReceivePacket (lpAdapter, lpPacket, TRUE);

⑨ 通过触发回调函数, 把捕获符合过滤器规则的数据包转发给网络协议分析模块进行分析处理。

⑩ 结束接收数据包, 释放数据包对象:

```
if (lpPacket!=NULL
{
    PacketFreePacket (lpPacket);
    lpPacket=NULL;
}
```

⑪ 关闭网卡设备, 将网卡恢复到正常接收状态:

```
if (lpAdapter!=NULL
{
    PacketCloseAdapter (lpAdapter);
    lpAdapter=NULL;
}
```

(4) 控制管理和同步模块

半实物仿真的一个显著特点是硬件在回路 (Hardware In The Loop)。在对系统进行仿真时, 若有实物介入整个仿真系统, 必须要求仿真时间标尺与实际系统时间标尺相同, 这种仿真称为实时仿真。实时仿真系统要求仿真时间 (Simulation Time, ST) 和自然时间 RT (Real Time, RT) 保持一致, 即有 $ST=RT$ 。为了满足半实物仿真的要求, HLA 必须采用特定的时间管理机制。

对于实物系统来说, 系统的运行是基于物理时间来推进的, 而网络仿真一般基于事件推进方式, 建立半实物仿真系统的前提条件是实际系统的运行速度和信息处理速度要低于计算机仿真系统的速度。在满足前提条件的情况下, 实时性主要由具有实时性时间处理机制的操作系统来提供保障。网络仿真需根据实物系统调整仿真速度, 使得仿真时间和实物时间保持同步。

控制管理与同步模块负责将实物系统和计算机仿真系统结合在一起, 完成合理的时间同步和控制后, 还要进行仿真时间与墙钟时间的映射。为了便于时间管理, 把所有的

信息交互加上时戳,按照不同信息的时戳来表示事件发生的时间顺序。在 HLA 联邦中,该时戳代表计算机仿真成员的仿真时间;在实物系统中,其代表实际系统的物理时间。接口设备既作为 HLA 联邦中的联邦成员,又作为实物系统设备,一方面承担着数据转发功能,另一方面完成时戳值在不同时间轴上的映射。

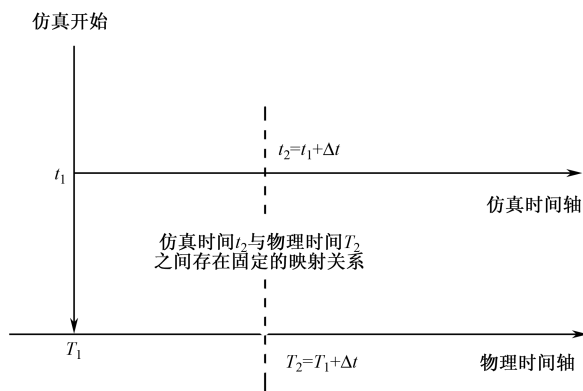


图 8.28 仿真时间与物理时间的映射

HLA 有三种时间推进方式:基于步长的时间推进、基于事件的时间推进和乐观的时间推进。乐观的时间推进利用时间回滚来纠正成员中的因果逻辑错误,但在半实物仿真中,回路中硬件的状态变化大多不可逆转。基于事件的时间推进是面向过程的仿真结构常用的推进方式,没有固定的时间推进步长,难以使 ST 和 RT 保持一致。因此,在半实物仿真中采用乐观的时间推进和基于事件的时间推进都是不适宜的,只能采用基于步长的时间推进方式。

HLA 的时间管理策略通过时间控制 (Time Regulating) 和时间受限 (Time Constrained),使每个联邦成员的时间管理处于 4 种可能的状态:时间既受控又受限,即逻辑时间同步;时间既不受控也不受限,即外部时间同步;时间受控但不受限,即逻辑时间主动;时间不受控但受限,即逻辑时间被动。半实物接口网关必须满足 4 个条件:接口的时间推进不能受限;发送事件的时戳对于其他邦员不能是过去事件;接口接收到事件的时戳也不能是过去事件;接口提出时间推进,RTI 必须马上批准。这就要求接口必须采取时间不受限的管理策略,而其他邦员采取时间不受控的管理策略。在这种情况下,半实物接口网关和其他联邦成员的时间策略有如下几种可能:

① 接口采用控制不受限,其他联邦成员采用非控制不受限

在这种方式下,接口以 TSO (消息传递的时间顺序分为时戳顺序 TSO (Time Stamp Order) 和接收顺序 RO (Receive Order)) 的方式发送消息,而其他联邦成员则以 RO 的顺序接收。这样做,在消息接收上不会产生顺序混乱。关键是这种方式下,其他联邦成员的时间推进不受整个联邦管理,可以以它自己的速度推进,如果推进过快,则接口发送的消息很多都是过去很久的事件,无法处理;如果推进很慢,却接收了接口设备的

未来事件，这也无法处理。所以，其他成员的速度无法控制，又有很大的不确定性。

② 接口采用控制不受限，其他联邦成员采用非控制受限

这种情况下，接口会以 TSO 的方式发送消息，而其他的联邦成员也以 TSO 的顺序接收，这就能很好地确保消息的时间有序性。同时其他联邦成员的时间推进要受到接口时间推进的限制，这样，它们就不会推进得太快。我们只要保证它们推进得不太慢就可以了，而这一点是比较好保证的。

③ 接口采用非控制不受限，其他联邦成员也采用非控制不受限

对于接口设备和其他成员来讲，如果时间管理策略都采用非控制不受限，则每个成员的时间都按照统一的物理时钟独立管理，各个联邦成员都按照各自的速度进行，互不控制，互不受限，数据的收发按照 RO 顺序（在数据上通过附加时戳的办法来确定事件的发生时间），以所能达到的最快方式传送，符合 DIS 仿真的要求。

④ 接口采用非控制不受限，其他联邦成员采用非控制受限

在这种方式下，整个联邦都没有时间控制成员，所以其他联邦成员也将不会受到限制；同时它们的消息收发也是以 RO 的顺序，所以这种方式实际上和第 3 种一致。

通过上述分析，解决半实物接口网关接入 HLA 仿真联邦的方法有两个：

① 所有成员（包括接口设备）都采用时间非控制不受限，各成员都按照统一的物理时钟独立推进，RTI 不参与时间步调的协调。此种情况，接口设备在程序处理上比较简单（按照 RO 顺序处理信息，信息时间以信息结构上的时戳为准），但它不能发挥 HLA 仿真的特点。

② 接口采用控制不受限，其他联邦成员采用非控制受限。此种情况，接口设备需要注意几个问题。

首先，在时间的推进上采用基于物理时钟定时器的步长推进，接口设备联邦成员每次都请求推进到当前物理时间所代表的仿真时间处；其次，在数据的发送上，由于时间控制成员只能发送时戳大于 $T+Lookahead$ 的事件，所以应在物理时钟 T 时刻，发送 T 到 $T+\Delta t$ 之间的所有事件，当物理时钟到达 $T+\Delta t$ 时再将时间推进到 $T+\Delta t$ ；最后，在数据的接收上，接口设备在响应定时器消息提出时间推进请求到 $T+\Delta t$ 时，RTI 就会将 T 到 $T+\Delta t$ 时间段内的事件都释放给接口设备处理，并尽可能快地批准时间推进请求。由此可看到，接收事件的处理会比实际的物理时钟慢 Δt ，这是由基于 HLA 的离散事件时间推进与基于原型系统物理时钟的连续推进引起的不可避免的误差，为了减小该误差（使原型系统能尽可能快、尽可能实时地接收外部数据），就必须使仿真时间推进长 Δt 尽可能小（最小时可等于 Lookahead 值-1ms）。

从上面的分析可以得出：半实物接口网关设备应当采取时间控制不受限的管理策略，而其他的联邦成员应该采取时间非控制受限的管理策略。大量的测试数据表明，此种时间管理策略能够最大限度地减小时间延迟，避免数据包丢失。

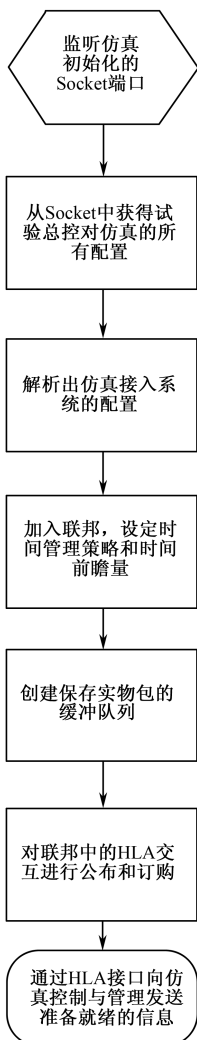
3. 接口关系

半实物接口网关设备是连接仿真网络与实装网络的接口设备，接入仿真网络需要通过 HLA 接口实现与仿真网络互连，此外，半实物接口还需接受仿真主控的统一调度和管理。半实物接口网关设备与实装网络互连考虑需支持两种接口：串口和网口，通过串口实现与战术台互连，通过网口与路由交换设备互联。

4. 处理流程

(1) 接入系统初始化过程

① 监听与仿真控制与管理建立的 Socket 连接；



② 从 Socket 中接收到包含仿真配置信息的数据块；

③ 对数据块进行解析，分离出各种仿真配置信息，主要包括联邦成员配置信息、业务配置信息和统计量定制信息；

④ 根据联邦成员配置信息进行仿真初始化；

⑤ 根据成员配置信息中的联邦名称，创建 HLA 联邦；然后根据成员配置信息中的联邦成员名称，把接入系统加入到联邦中；

⑥ 根据成员配置信息中的时间管理策略，设置联邦成员的时间管理方式：时间控制、时间受限、时间控制且时间受限、非时间控制和时间受限；然后设置联邦成员的时间前瞻量；

⑦ 创建数据包等待队列，用来存放网络数据处理模块中捕获的数据包；

⑧ 对联邦中存在的 HLA 交互进行预处理：公布接入系统可以产生的 HLA 交互，订购接入系统关心的 HLA 交互；

⑨ 完成联邦初始化，通过 HLA 交互通知仿真控制与管理已经完成联邦初始化工作，等待开始仿真。

具体接入系统的初始化操作流程如图 8.29 所示。

(2) 从实物网络到仿真网络的数据处理流程（见图 8.30）

① 首先获取接入系统计算机的 MAC 地址，每次往实际网络发送真实 IP 数据包的时候都需要在数据包中添加本地的 MAC 地址作为源 MAC 地址；

图 8.29 接入系统的仿真初始化

② 获取本机的设备列表，从中选择使用中的网络设备端口，即选择与实物网络相连的网卡；以非混杂模式打开网卡适配器，从而只捕获到本机的数据，减少数据处理量；

③ 定义数据过滤器，只捕获发送给本端口的，且目的 IP 地址不是本机的数据包，即只捕获需要本机转发的数据包；编译并设置该数据包过滤器；

④ 按照设置，对选定的网卡适配器进行数据包捕获；

⑤ 将捕获到的数据包加入到数据等待队列中；

⑥ 等待当 HLA 处理模块可以处理数据包的时候，再从队列中取出数据包进行处理；

⑦ 根据等待队列中数据包的目的 IP 地址信息，以及接入系统从试验总控得到的网络拓扑信息，得到下一跳节点的信息，将数据包和信息传递给 HLA 处理模块。

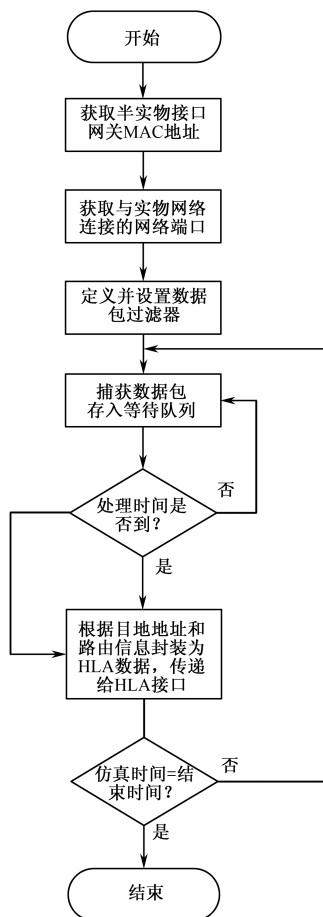


图 8.30 对实装网络数据包的处理流程

(3) 从仿真网络到实物网络的数据处理流程（见图 8.31）

① 仿真网络的业务数据从 HLA 处理模块中获取，接收到的 HLA 交互中携带的数据；

② 从数据中查询目的 IP 地址；

③ 通过目的 IP 地址查询出目的 MAC 地址；如果接入系统计算机直接连接到目的节点上，那么目的 MAC 地址就是目的节点的 MAC 地址；否则，接入系统计算机通过路由协议的处理，得到下一跳节点的 IP 地址，从而查询下一跳节点的 MAC 地址，即本数据包的目的 MAC 地址；

④ 将数据封装到实际网络数据包中；把数据包的源 MAC 地址设为本机的 MAC 地址；

⑤ 通过 WinPcap 提供的数据包发送 API 将实际网络数据包发送到实物网络中的目的节点。

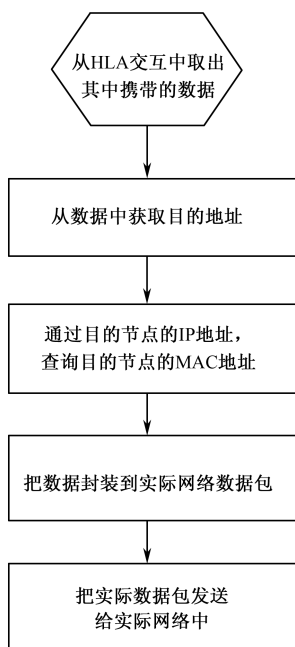


图 8.31 对仿真网络数据包的处理流程

8.3 网络仿真模型

8.3.1 建模内容

战术通信仿真系统模型是网络仿真系统的核心组成部分，根据战术通信系统仿真建设的任务和目标，战术通信仿真系统是一个链路级以上的网络仿真系统，其仿真建模的工作重点为：战术通信系统的关键协议、技术体制、战术通信环境和组织应用的仿真建

模。仿真建模的详细内容如下:

(1) 通信协议建模

通信协议模型是构造网络系统设备模型和进行网络仿真的基础,战术通信仿真系统主要包含有战术应用、传输控制、网络通信、链路控制、物理信道五个层次的仿真模型,每个层次的仿真模型及其仿真运行的特征均不相同,因此,整个仿真系统将根据实际系统的各个层次的系统特征采用不同的仿真策略。

主要的协议模型包括:

- 应用层协议:根据指挥控制流程以及作战信息报文长度和发送频度,建立相应的态势、指控、自由文书、静态图像、动态图像、话音等业务流量模型;
- 传输层协议:TCP、UDP等;
- 网络层协议:TCP/IP协议族、路由交换设备中的路由协议,如OSPF、EIGRP、RIP等;
- 信道接入协议,包括高速电台、VHF、HF的传输设备的关键协议TDMA、CSMA等;
- 物理链路层协议,包括战术通信系统中VHF、HF等各种无线链路以及有线链路的物理信道的建模。

(2) 通信设备建模

网络通信设备包括:各种无线电台(HF、VHF、UHF电台)、路由交换设备、交换机设备、用户终端设备等。

(3) 作战单元的建模

战术通信系统中的作战单元主要以各种通信车、指挥车、作战车构成,它们由各种通信设备模型组成。

(4) 通信环境建模

通信环境建模是对战术通信系统所处环境的模拟,具体包括:

- 移动模型:描述节点在通信过程的位置移动;
- 干扰模型:描述节点在通信过程中的信息干扰;
- 地形模型:描述节点在通信过程中的地形信息;
- 故障/恢复模型:描述节点在通信过程中的故障以及修复过程。

(5) 网络场景建模

战术通信系统是由各种作战单元通过有线或无线互联在一起组成的一个无缝网络。网络场景建模就是根据作战组织应用构建不同规模和拓扑结构的战术通信网络,它包含两个方面的内容:地形地景建模以及网络拓扑结构建模,网络拓扑结构建模包括网络拓扑结构的初始化(网络各个层次上的节点个数、频率分配、IP分配等)和网络各个节点的移动特性设计。

8.3.2 模型体系

战术通信系统仿真模型除了满足仿真建设的需要外，还必须实现模块化、层次化，建立标准的接口关系，以满足模型的扩展性和重用性，其层次划分要求基本与网络的组织层次关系保持一致。

战术通信仿真模型基本遵从图 4.2 所示的基本层次关系，同时依据战术通信系统组织应用关系，建立了如图 8.32 所示的仿真模型架构。最底层为协议模型，依据战术通信系统协议设计进行构建；设备模型对应战术通信系统实际装备，它依据设备的技术方案构建；作战节点模型就是作战单元模型，它对应实际武器平台如各种通信车和通信系统；网络模型根据实际的网络规划（IP 规划、频率规划等）以及部队组织编成进行构建。最后由网络模型和通信环境模型共同构建成战术通信系统仿真模型。可以看到这种模型层次架构也基本能够与战术通信系统组织建设的层次关系保持一致。

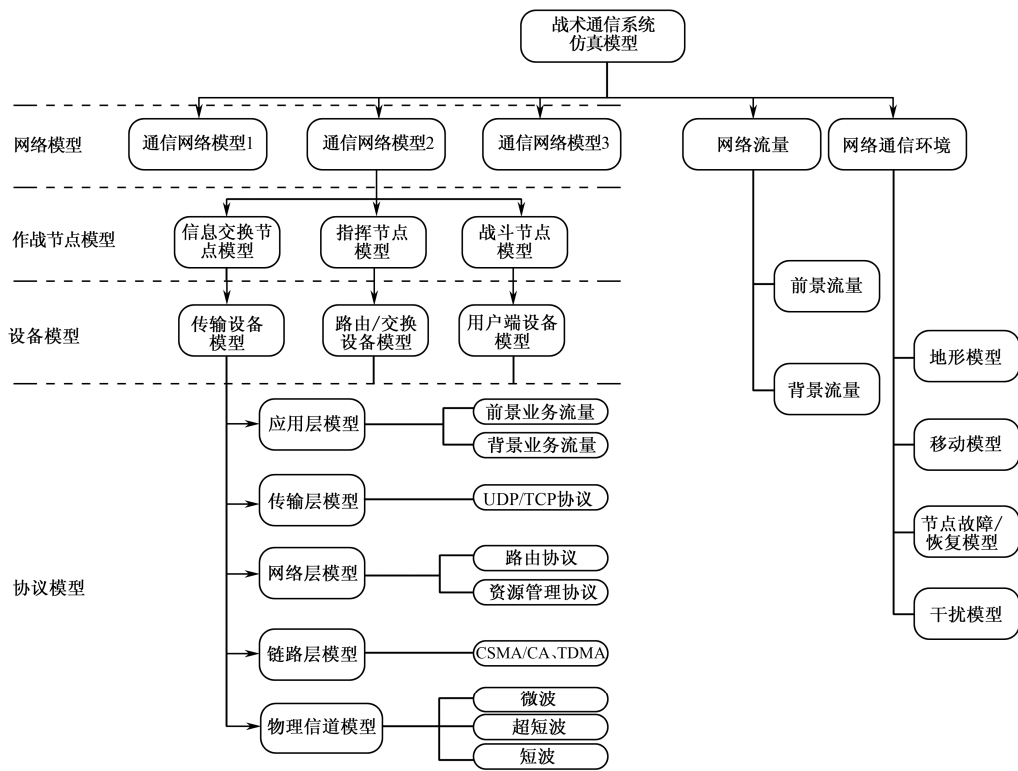


图 8.32 战术通信系统仿真模型层次

8.3.3 模型的组织应用

仿真主要有两个目标：精确性和高效性。对一个实际的网络进行建模的过程实际上既是对其进行抽象的过程，通常情况下，精确性是仿真所要达到的首要目标，然而，在对大型网络进行仿真时不得不牺牲一定的精确度来换取仿真的高效性，使仿真执行者能够在最短的时间内达到预期的仿真目的。因此，明确仿真目的（网络设计关注的重点问题）对于建模是非常重要的一步。

网络仿真的建模采用层次化的建模方式，这与网络设计保持了一致性，同时也提高了网络模型的扩展性和重用性。

其基本模型组织应用（见图 8.33）过程如下：

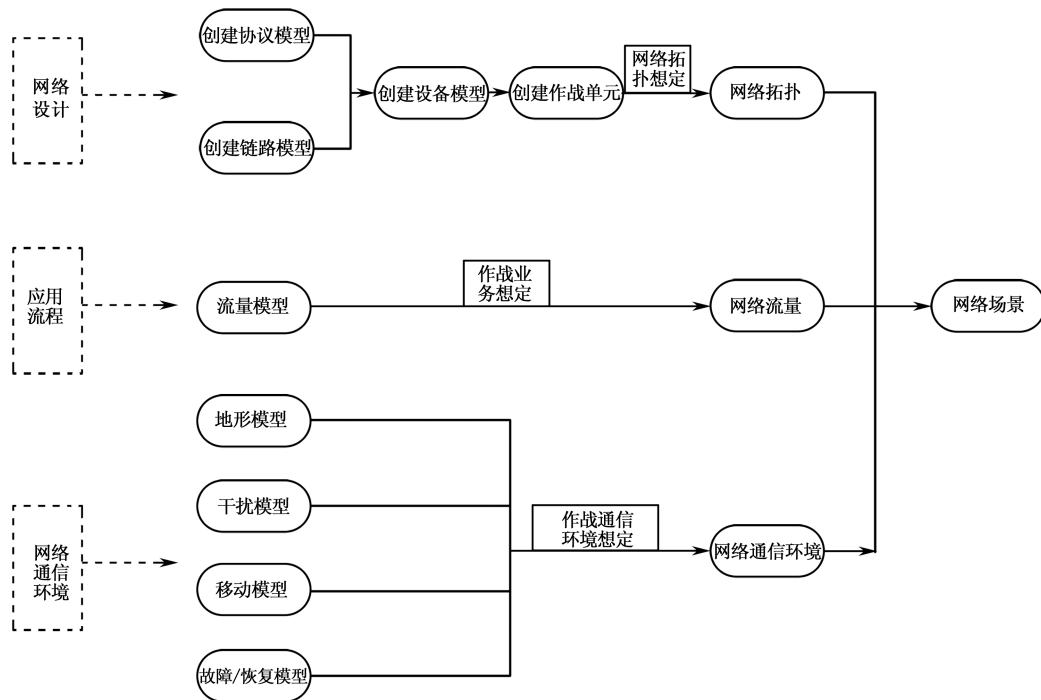


图 8.33 模型组织应用

① 根据网络设计构建基本仿真网络模型，网络模型的构建必须是逐层构建的，首先构建基本协议模型、链路模型（物理信道模），通过协议模型和链路模型构建设备模型（包含：端用户设备、路由设备、传输设备等），通过基本的设备模型库来构建作战单元模型（包含指挥车、通信车、作战武器平台等），最后通过基本的作战单元模型构建网络拓扑模型；

② 网络中不同的流量特性，也影响到网络性能，因此，需根据某一作战想定建立网

络运行的流量模型；

③ 某一作战的环境不同决定了网络的通信环境，不同的通信环境作为网络的运行的外部因素会直接影响到网络性能。仿真网络建模中，会根据作战通信的想定情况，建立网络通信环境模型；

④ 在建立好网络拓扑模型、网络运行的流量模型以及网络通信环境模型后，就组建完成了对某一作战想定情况下的仿真网络场景；

⑤ 通过这种层次化、模块化的建模方式，可以根据不同方案设计、不同的作战想定构建不同的仿真网络场景，从而对不同情况下，不同的方案设计进行多次的仿真分析和验证。

8.3.4 模型设计

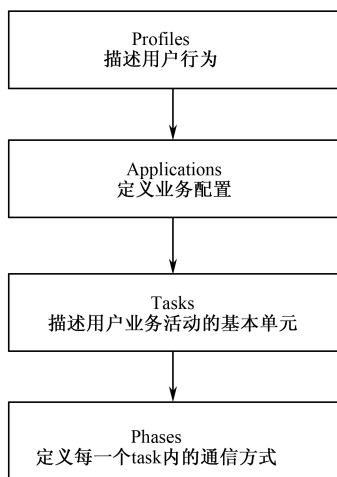
在前面已经介绍过建模的主要内容，下面主要详细描述是如何进行建模的。

1. 协议模型

网络通信协议模型是构造网络系统设备模型和进行网络仿真的基础。协议模型中的每一个进程模型采用有限状态机的方式来实现。为了实现进程的通用性和扩展性，进程模型采用主进程调用子进程的方式。每增加一种协议模型，就添加一个子进程模型到主进程当中去。

(1) 应用层

应用层模型可以采用标准的 **Application traffic models**，它支持前景流量建模（从系统整体的角度考虑，在建模时可将业务区分为前景流量、端到端流量以及设备/链路的负载的背景流量）。这里只涉及了前景流量的建模，是指主机之间具体的请求/应答行为，因此所有的数据都具有明确的模型。



Application traffic models 采用 **MTA (Multi-Tier Application)** 模型，基于 **Client/ Server** 方式，在 **OPNET** 中进行仿真时，要应用 **Tasks**、**Application** 和 **Profiles** 模块的体系结构。在档案 (**Profiles**) 中包含一系列的业务，而业务 (**application**) 可表现为一个简单的业务源，或是一组离散的任务。任务 (**task**) 由多个阶段 (**phase**) 构成，在阶段中又包含了数据的交换。如图 8.34 和图 8.35 所示。

图 8.34 MTA 业务的层次关系

应用层模型的功能主要有以下两点：

- 加载业务：根据网络流量规划，按时产生符合业务特征要求的仿真业务；
- 接收业务：接收并处理到达的仿真业务，统计业务的性能，包括业务的端到端时延、吞吐量等。

图 8.36 详细描述了在仿真设计中应用层的流程，通过业务产生的大小和频度模拟不同特性的业务。

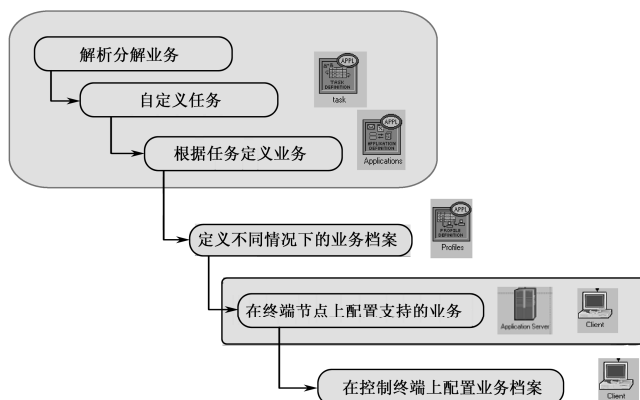


图 8.35 MTA 业务层与模型的对应关系

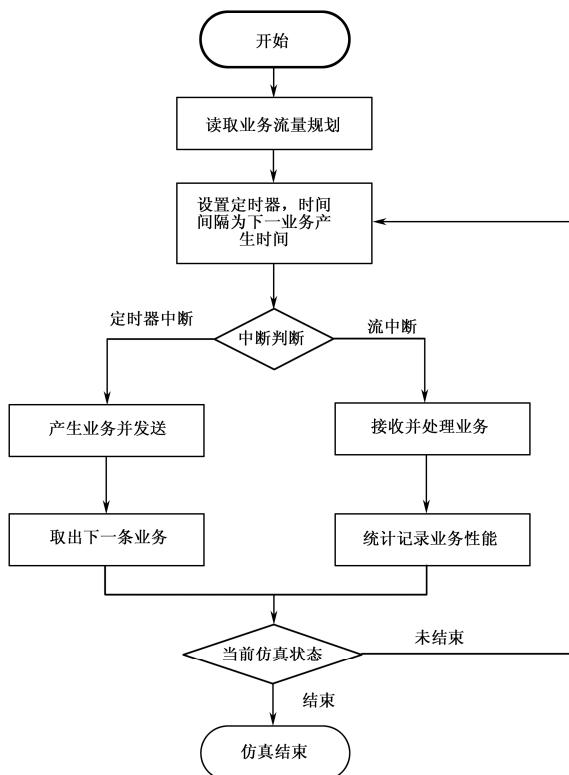


图 8.36 应用层模型处理流程图

根据战术通信系统的实际应用特征，在仿真系统中定义了几种业务模型，如态势、指控、情报、作战文书、话音、视频等业务等，每一类业务有如下属性：

- 业务名；
- 业务报长；
- 业务间隔时间；
- 业务优先级；
- 支持的传输协议。

其中业务报文长度和业务间隔时间可以按某一概率分布计算。目前仿真平台提供了 23 种概率分布函数模型，表 8-13 所示是常用的几种概率分布。

表 8-13 概率分布类型

概率分布类型	描述参数	适用情况
Normal 分布	均值、方差	数据包大小
Possion 分布	均值	业务间隔时间，业务到达时间
Constant 分布	输出值	常数模型
Exponential 分布	均值	间隔时间
Uniform 分布	最大值、最小值	目标地址
Pareto 分布	位置、形状、规模	自相识业务流
Bernoulli	均值	随机试验
Erlang 分布	顺序、均值	电路交换网络的呼叫

（2）传输层

TCP/IP 协议为传输层指定了两个协议：UDP 和 TCP，它们都是应用层和网络层的中介物。

UDP 叫做无连接的、不可靠的运输协议，它除了提供进程到进程的通信外，就没有给 IP 服务添加任何东西，此外它还完成非常有限的差错检验。UDP 是一个非常简单的协议，只有最小的开销，如果一进程想发送一个很短的报文而不关心可靠性，就可以使用 UDP。

TCP 叫做面向连接的、可靠的运输协议，它给 IP 服务添加了面向连接和可靠性的特点。TCP 提供的服务是对应 UDP 所没有提供的，包括流式数据服务、全双工服务、可靠服务。TCP 使用滑动窗口协议完成流控制，它使用确认分组、超时和重传来完成差错控制。

（3）网络层

网络层的建模非常重要，在这一层可以实现路径选择和资源管理等功能，这里对通信网络内常用的几种路由协议进行了描述。在战术通信系统中可能存在多种路由协议，

有的是实际装备已经具有的,有的是需要仿真进行分析比较的,这都需要在仿真中建模。所有的路由协议通过 IP 模块关联起来,通过在 IP 协议参数上进行手动设置,灵活选择当前仿真需要的路由协议,而不需要重新设计节点模型和网络模型,增加了仿真的灵活性和可扩展性。

① IP 协议

网际协议(IP),是一种不可靠的无连接数据报协议,它不提供差错检验或跟踪,只是尽最大努力将数据报传输到目的地。

在仿真中,IP 协议是在标准模型上进行的开发,它加入了符合战术通信系统要求的其他功能,可以通过进程调用等方式加入战术通信系统特定的路由协议模型等。

在仿真运行前,可以对 IP 协议的相关参数进行设置,以符合仿真的特定需求。仿真属性可以设置的有:

- 子网编号;
- IP 地址;
- 子网掩码;
- 路由协议;
- MTU 大小;
- 当前激活状态。

② RIP

RIP(Routing Information Protocol)路由协议,是内部路由选择协议,它使用在一个自治系统的内部,是基于距离向量的分布式路由选择协议,它的最大优点就是简单。在仿真进行前,可以对 RIP 协议的相关参数进行设置,以符合仿真的特定需求。仿真属性设定:

- Start time(开始时间);
- Stop time(结束时间);
- Update Interval(Seconds)(更新间隔);
- Timeout Value(Seconds)(超时值);
- Holddown(seconds)(保持时间)。

③ OSPF

OSPF(Open Shortest Path First)路由协议,是开放最短路径优先协议,是由 IETF(Internet Engineering Task Force)IGP 工作小组提出的,是一种基于 SPF 算法的路由协议。OSPF 路由协议是一种典型的链路状态(Link-state)的路由协议,一般用于同一个路由域内。在这里,路由域是指一个自治系统(Autonomous System),即 AS,它是指一组通过统一的路由政策或路由协议互相交换路由信息的网络。在这个 AS 中,所有的 OSPF 路由器都维护一个相同的描述这个 AS 结构的数据库,该数据库中存放的是路由域中相应链路的状态信息,OSPF 路由器正是通过这个数据库计算出其 OSPF 路由表的。

在仿真进行前,可以对 OSPF 协议的相关参数进行设置,以符合仿真的特定需求。
仿真属性设定:

- Hello Interval (Seconds) (Hello 报文间隔);
- Router Dead Interval (Seconds) (路由失效时间);
- Interface Transmission Delay (seconds) (接口传输时延);
- Retransmission Interval (seconds) (重传间隔时间)。

④ EIGRP

EIGRP 即“增强型内部网关路由协议”,是 CISCO 公司开发的专有路由协议,没有标准化,是典型的平衡混合路由选择协议,它融合了距离向量和链路状态两类路由协议的最佳特性,使用散射更新算法,实现了很高的路由性能。

EIGRP 是加强的 IGRP,也就是再度改良 IGRP 而成 EIGRP, EIGRP 结合了距离向量 (distance Vector) 和链路-状态 (link-state) 的优点以加快收敛,所使用的方法是 DUAL (Diffusing Update Algorithm),当路径更改时, DUAL 会传送变动的部分而不是整个路径表,而 Router 都存储有邻近的路径表,当路径变动时, Router 可以迅速地反应, EIGRP 也不会周期性地传送变动讯息以节省频带的使用。

EIGRP 是一个平衡混合型路由协议,既有传统的距离矢量协议的特点:路由信息依靠邻居路由器通告,遵守路由水平分割和反向毒化规则,路由自动归纳,配置简单;又有传统的链路状态路由协议的特点:没有路由跳数的限制,当路由信息发生变化时,采用增量更新的方式,保留对所有可能路由(网络的拓扑结构)的了解、支持变长子网掩码、路由手动归纳。该协议同时又具有自己独特的特点:支持非等成本路由上的负载均衡,采用差分更新算法 (DUAL) 确保在无路由环路的前提下,收敛迅速。因而适用于中大型网络。

在仿真进行前,可以对 EIGRP 协议的相关参数进行设置,以符合仿真的特定需求。
仿真属性设定:

- Hello Interval (Seconds) (Hello 报文间隔时间);
- Hold Time (Seconds) (路由持续时间)。

⑤ MPLS

MPLS 网络与传统 IP 网络的不同主要在于 MPLS 域内部 LSR 之间使用 MPLS 协议进行通信,主要是一个 LSR 将它所做的标记 / FEC 绑定通知到另一个 LSR 的程序集,并为了获知彼此的 MPLS 能力而进行的任何协商,而在 MPLS 域的边缘由 MPLS 边缘路由器进行与传统 IP 技术的适配。MPLS 协议建模的模型主要包括: LDP 发现、LDP 会话、LSP 管理,分别如图 8.37~图 8.39 所示。

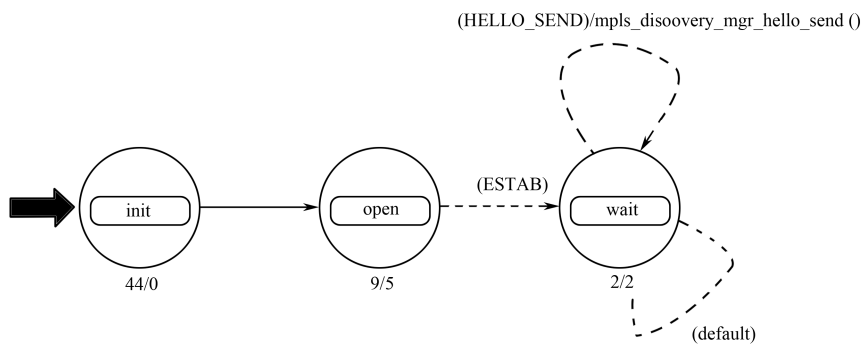


图 8.37 LDP 发现进程状态转移图

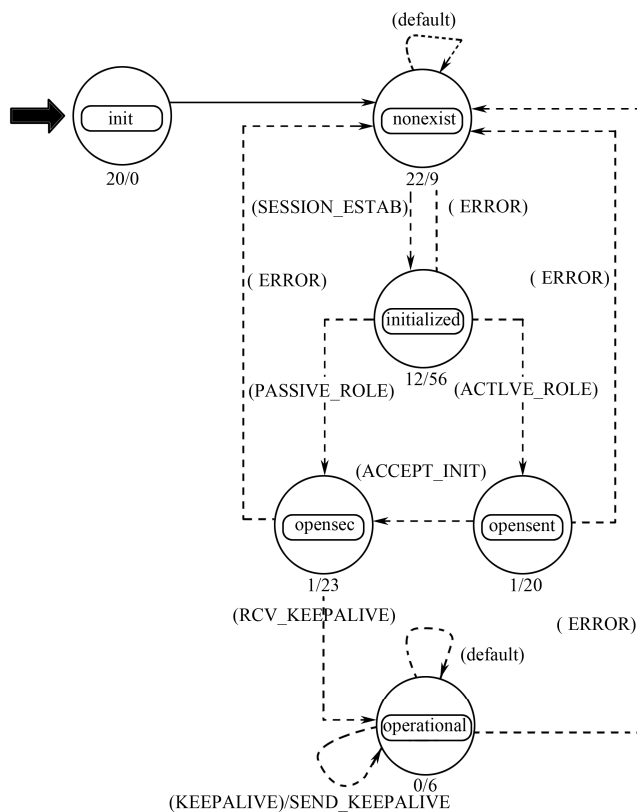


图 8.38 LDP 会话进程状态转移图

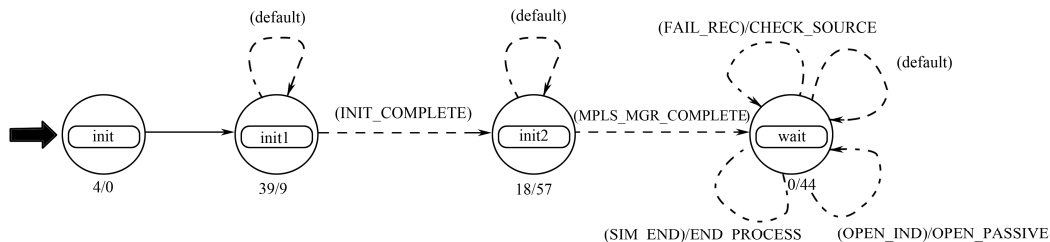


图 8.39 LSP 管理进程状态转移图

(4) 数据链路层

在战术通信系统中存在有线链路和无线链路两种情况。有线链路的数据链路层模型功能相对简单，不是需要重点研究的关键技术，在仿真中可以将这一部分模型弱化，采用收到即发的处理方式，对仿真结果不会产生影响，还可以节省仿真资源。无线链路的数据链路层模型功能较多，不同的设备需要采用不同的模型，模型设计的精确性，直接影响到仿真结果的准确性，因此在建模时应更加仔细。下面对常用的几种数据链路层模型的建模进行详细说明。

① TDMA 协议

TDMA 协议是时分多路存取协议，是以时间作为信号分割的参量，使各路信号在时间轴上互不重叠，利用不同的时隙来传送各路不同信号。TDMA 协议的实现有两种方案：同步 TDMA 和异步 TDMA。

同步 TDMA 方案中时隙的分配是预先约定的，且固定不变。它的优点是控制简单，接收设备只要根据预先约定的时隙分配方案，将各时隙内的数据分发到不同的输出线路即可；但缺点是当某个信号源没有数据时，它的时隙也不能被其他用户使用，不能充分利用信道。在仿真模型设计时，可以预先划分相应的时帧，并规定时帧中每个时隙的应用类型，时帧可以依据组网电台的数量进行扩展。在进程设计中，可以根据网络规模确定总时隙数，但必须保证每个节点在一帧内至少一个时隙。语音时隙采用竞争机制，先抢占者得。用户在分配给自己的固定时隙内发送数据、语音等业务量较固定的信息。图 8.40 所示是同步 TDMA 协议的工作流程。

异步 TDMA 方案中的时隙是按需分配的，需要发方必须提出申请，才能获得所需的时隙。这种方案可以充分利用信道，但其控制方式较为复杂。

② CSMA/CA 协议

CSMA/CA 协议是非持续式 CSMA 信道多址访问协议，它是由发送方来侦听信道是否空闲。它在 CSMA 的基础上进行了一定的改进，在监听上不再是每发一包数据都要监听信道是否忙，而是发送一组包时监听一次：在发送第一包数据时监听信道，如果信道

空闲，则延迟一段时间，再监听，如果此时信道依然空闲，则说明此时信道可用，不会发生冲突，则连续发送该组数据包，如果信道变为忙，则继续监听，直至它空闲。

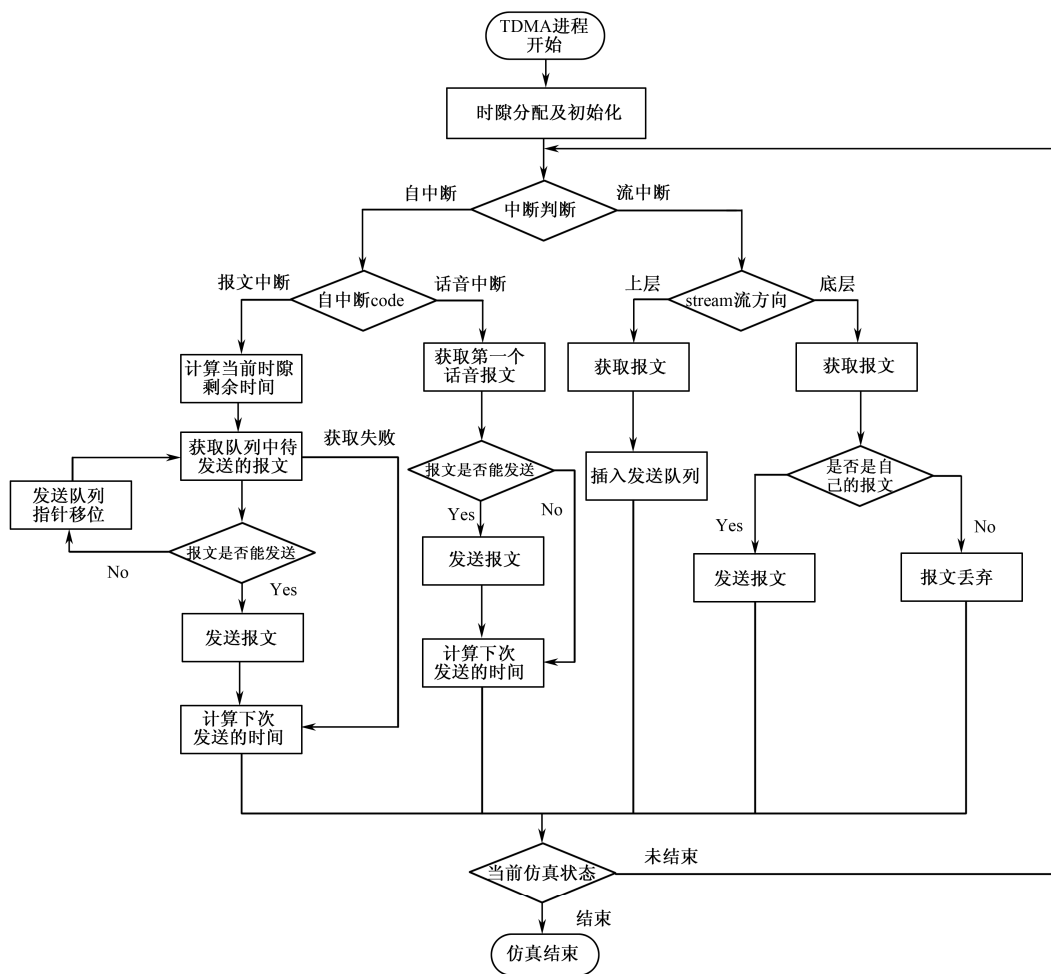


图 8.40 同步 TDMA 协议流程图

采用 CSMA/CA 协议可以解决无线产品不易检测信道是否存在冲突的问题，一方面，载波侦听——查看信道是否空闲；另一方面，避免冲撞——信道不空闲时，通过随机的时间等待，直到有新的空闲信道出现时再优先发送，使信号冲突发生的概率减到最小。

在仿真中，信道空闲与否这一状态通过无线发射机的反馈来决定。节点从无线发射机中引出一条到 MAC 层的统计线，用来向 MAC 层报告无线信道的状态。如果无线信道处于空闲状态，那么无线发射机向 MAC 层发送状态中断，表明无线信道处于空闲状态。MAC 层收到无线发射机传来的状态中断后就可以判断无线信道的状态。

MAC 层初始化后处于空闲状态, 这时候收到从高层来的数据包, 首先检查无线信道的状态, 如果处于空闲状态, 那么马上就可以把报文发送出去; 如果无线信道处于忙状态, 就需要把报文加入到等待队列, 等待无线信道空闲, 此时 MAC 层处于忙状态。

在无线信道还处于忙状态的时候, MAC 层收到从高层来的数据包, 首先把数据包加入到等待队列中, 同时进行载波侦听工作, 直到无线发射机传来状态中断告诉 MAC 层无线信道处于空闲状态; 然后 MAC 层进入退避状态, 等待一段随机设定的时间, 发送报文。

在战术通信系统中由于同时存在话音业务和数据业务, 要求话音和数据业务必须兼容, MAC 层必须具有能自动识别话音、数据业务的功能。规定话音呼叫优先级高于数据传输, 数据只有在信道检测到空闲时才能发送。在发送数据时, 同时要检测话音发送请求; 如果有话音发送请求, 则立即终止当前数据发送, 转换到通话状态, 并保存未发送数据; 在通话结束后, 继续发送未发送完的数据。CSMA/CA 的进程流程图如图 8.41 所示。

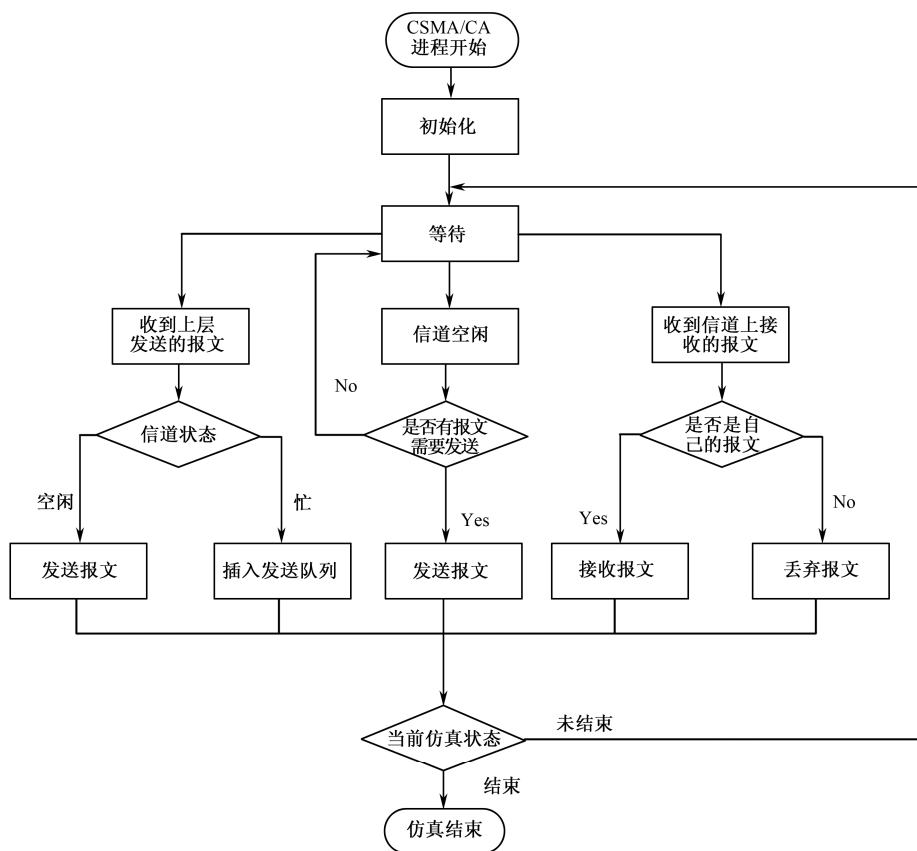


图 8.41 CSMA/CA 协议流程图

③ ALOHA 协议

ALOHA 协议是在网络通信量较小。用户自由发送数据所产生的冲突概率很低的情况下采用的协议，在战术通信系统中也有应用的可能。

ALOHA 协议的基本思想是：若一个空闲节点有一个分组到达，则立即发送该分组，并期望不会与其他节点碰撞。图 8.42 所示是 ALOHA 协议建模的流程图。

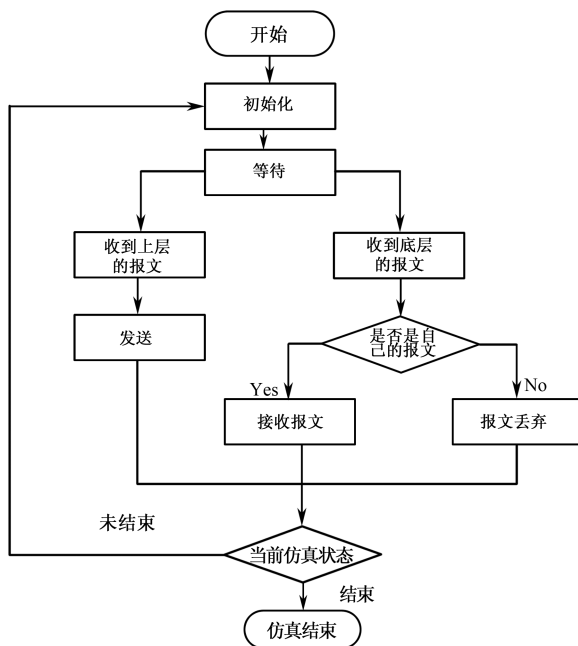


图 8.42 ALOHA 协议流程图

(5) 物理层

物理层可分为无线链路模型和有线链路模型，表 8-14 列出了主要的无线链路类型。

表 8-14 无线链路的类型

链路名称	工作频段	传输速率	电台功率	调制方式	纠错门限
短波（HF）电台	1.6~30MHz	75~2400bps	20W/125W	USB、LSB、ISB、 CW、AM	
超短波（VHF）电台	30~225MHz	2.4、4.8、9.6、19.2、 38.4、64、256kbps		FM、GMSK、 8CPM+TCM、8PCM	
高速电台（UHF）	225~512MHz	64k、256k、512k、 1024k、2048kbps		8CPM+TCM	

由于无线通信信号是在空间中进行传输的，因此要受到现场环境的影响；另外，由于无线信号的收发是通过天线来完成的；再者，对于不同的无线链路类型都有不同的链

路参数,如表 8-14 所示。因此,对于无线链路的建模要包括三部分内容:无线传播模型、天线模型、无线收/发信机模型。无线传播模型的建模主要是对无线环境下传播路径损耗的建模,充分考虑无线信道的时变特性,以及由于节点移动而带来的多普勒频移的影响,它主要完成战术通信系统中收发信机在特定环境下路径损耗的计算。无线收发信机的建模包括:频率、发射功率、接收功率、调制方式、天线的建模等,主要完成战术通信系统中网络设备信道特征的建模。

① 传播模型

对于无线通信系统来说,必须要对无线传播环境进行精确的建模和仿真,这样才能保证整个系统仿真的逼真度,仿真的结果也更具可信性。这部分采用 Wireless InSite 仿真软件来完成,该软件能够规划和预测地形和建筑物对电磁波传播的影响,运用高级的电磁处理方法,能够在 40GHz 之内的频段范围内提供精确的计算结果。它主要完成室内和室外传播预测,通过将电场与具体的天线模式相结合来计算路径损耗等。并将 Wireless InSite 作为一个联邦成员加入到仿真系统中。

该仿真工具提供许多已有的传播模型,根据战术通信系统的无线通信频率要求,同时考虑仿真精度的要求,可以采用如表 8-15 所示的传播模型。

表 8-15 无线传播模型及其描述

传播模型	适用范围	模型描述
Fast 3D Urban model	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 最大反射: 无限制 ✧ 最大衍射: 3 (SBR), 2 (Eigenray) ✧ 环境: 城市 ✧ 地形: 地形起伏轻微 ✧ 城市: 屋顶为平面 ✧ 范围: 1km ✧ 天线: 无限制 ✧ 最小频率: 100MHz ✧ 最大频率: 无限制 	采用简化射线跟踪算法,应用于天线放置在地面附近,建筑等障碍物近似为无穷高的情况,不考虑建筑物上表面的绕射,反射等情况
Full 3D model	<ul style="list-style-type: none"> ✧ 最大反射: 无限制 ✧ 最大直射: 无限制 ✧ 最大衍射: 3 (SBR), 2 (Eigenray) ✧ 环境: 无限制 ✧ 地形: 无限制 ✧ 城市: 无限制 ✧ 天线: 无限制 ✧ 最小频率: 100MHz ✧ 最大频率: 无限制 	采用完整射线跟踪算法,对计算区域的所有因素都计算考虑,没有近似。在可近似的环境下,用此模型的计算时间会相对近似模型较长,但通用性最好

续表

传播模型	适用范围	模型描述
Vertical Plane model	<ul style="list-style-type: none">最大反射：无限制最大衍射：4环境：适用非规则地形以及带建筑和植被的环境地形：无限制城市：无限制天线：无限制范围：20km最小频率：100MHz最大频率：无限制	采用简化的射线跟踪算法，计算 VHF 和 UHF 频段，最适合非规则地形计算
Urban Canyon FDTD model	<ul style="list-style-type: none">环境：城市地形：平坦城市：无限制天线：全向、水平、垂直最小频率：无限制最大频率：无限制	与 Fast 3D Urban model 一样适用于天线放置在地面附近，建筑等障碍物近似为无穷高的情况，不同的是方法上采用了经典电磁计算方法 FDTD（时域有限差分法），理论上精度要高于射线跟踪算法，但计算需要的时间和内存较大
MWFDTD model	<ul style="list-style-type: none">最大反射：无限制最大衍射：无限制环境：适用非规则地形以及带建筑和植被的环境地形：无限制城市：无限制天线：高度不限制、全向、水平或垂直极化范围：取决于计算机内存、频率和时间最小频率：无限制最大频率：无限制	采用经典电磁计算方法 FDTD（时域有限差分法），对计算区域的所有因素都计算考虑，没有近似，适合于非规则地形的精确计算

从以上传播模型列表，根据模型的适用范围和计算机精度，本系统选用 MWFDTD（MOVING WINDOW FDTD）模型。MWFDTD 采用了传播无线脉冲限制在一个空间域中的方法。经典的 FDTD，电磁信号仅占计算网格的一小部分，这在网格剩余部分浪费了大量的计算。基于这种情况，MWFDTD 计算网格被限制在仅仅包含脉冲的空间域中。这样，由于脉冲沿着地形传播，计算网格会沿着脉冲移动，以便无线波脉冲总是在计算网格内。这样，就确保了在每个时间步长，仅计算该区域场强不为零的值。MWFDTD 的概念示意图如图 8.43 所示。

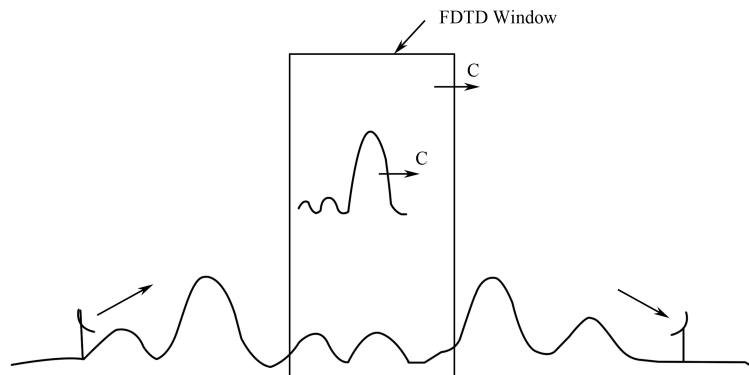


图 8.43 MWFTD 的概念示意图

MWFTD 模型算法如下：

- 构建一个 FDTD 网格，该网格要足够包含脉冲和地形起伏高度并且在地形最高处构建少数的菲涅耳区；
- 用有限差分时域方法求解麦克斯韦方程；
- 在每一个时间步长，确定脉冲中心位置。如果脉冲太密不能固定 FDTD 网格的边缘，那么通过栅格点移动该区域和地形到边缘。当在拖动边缘时，被脉冲留在后面的地形被删除。

在仿真运行中，接收端的电磁场以时间的函数记录下来。根据电磁场的时间记录，计算出每个接收端的路径损耗。

MWFTD 是 WI (Wireless InSite) 计算精度最高的一个模型，因此其运算的速度较慢。该模型不同于其他几个传播模型，不是基于射线跟踪，不必指定射线的类型和数目。

MWFTD 输入设置参数：

- cells per wavelength (该参数决定了 FDTD 网格的点的密度)；
- window height and window width (FDTD 的窗口大小)。

MWFTD 输出：路径损耗/路径增益、接收功率。

以上传播模型基于 UTD/GTD 理论，采用射线跟踪方法建立传播模型，使用了一些计算机图形的方法加速模型的建立和处理，采用的算法当中包括 2D，3D 以及快速 3D 的算法，根据散射的特性以及跟物体相关的反射、透射系数评估电场、磁场，通过将电场与具体的天线模式相结合来计算路径损耗，到达时间以及到达角度等。

② 天线模型

利用 Wireless InSite 提供的各种通用天线模型，包括线性偶集子天线，喇叭天线，贴片天线等，对其进行参数的修改，建立符合战术通信系统中使用的天线模型。也可以从外部导入 NSMA 格式，Odyssey 和 MSI Planet 格式的通信天线，完成天线的建模。

③ 无线收发信机模型

对于每个发射信道和接收信道对，它们之间的整个无线传输过程可以用一系列功能单一的子传输阶段的组合来描述，这些传输阶段是仿真无线链路所涉及的一系列参数计算。有些无线链路的参数互为因果，时间上有先后顺序，所以传输阶段的排列顺序也应按照实际传输的先后顺序来定。对无线链路的建模采用 14 个首尾相连的管道阶段来尽量接近真实地模仿数据帧在信道中的传输。14 个管道阶段，发信机有 6 个，收信机有 8 个。

发信机模型的管道阶段，以及先后顺序如图 8.44 所示。需要说明的是，当发信机模型与天线模型，以及传播模型结合时，可以不需要发射天线增益这个阶段，因为这部分工作已经由天线模型和传播模型完成。如果不结合，则发信机模型可以单独完成无线链路发信机的建模。

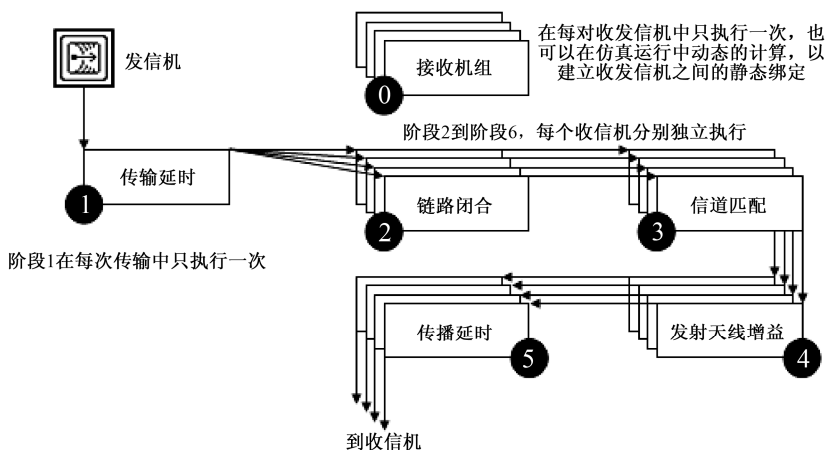


图 8.44 发信机模型

- 接收机组：它主要用来确定候选的收信机对象，排除明显不符合的对象，判断的条件有：频率、收发信机之间的距离等；
- 传输时延：计算包发送需要的时间，计算方法：传输时延 = 包长 / 传输速率；
- 链路闭合：它是收发信机之间是否建立连接的最终决定，通过无线链路物理可达性进行判断，如果收发信机之间不建立链路闭合，则不进行后续的管道阶段计算；
- 信道匹配：根据收发信机的频率、带宽、数据速率、扩频码 4 个属性来判断信道是否匹配，进而确定两者之间数据包的性质：即有效包、噪声包、可忽略包；
- 发射天线增益：表示发信机天线的增益，在结合天线建模时，就不再需要这个阶段；

- 传播时延：传播时延是数据包在无线链路中所经历的另一部分延时，计算方法：传播时延=收发信机之间的距离/光速。

收信机模型的管道阶段，以及先后顺序如图 8.45 所示。和发信机一样，当收信机模型与天线模型以及传播模型结合时，则不需要接收天线增益这个阶段，而在接收功率和干扰噪声阶段不再需要计算，而是直接读取天线模型和传播模型结合计算后的输出结果。如果不结合，则收信机模型也可以单独完成无线链路收信机的建模。

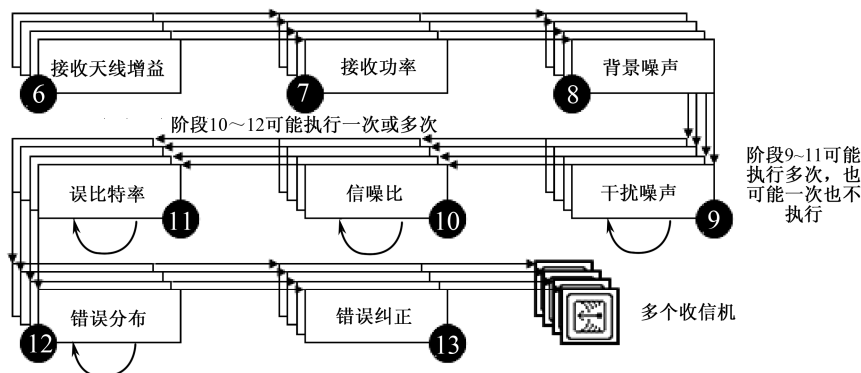


图 8.45 收信机模型

- 接收天线增益：表示收信机天线的增益，在结合天线建模时，就不再需要这个阶段。
- 接收功率：此阶段只对到达接收机的有效包和噪声包计算接收功率，计算公式： $\text{接收功率} = \text{发送功率} \times (\text{重叠带宽}/\text{发送带宽}) \times \text{发送天线增益} \times \text{路径损耗} \times \text{接收天线增益}$ 。如果与天线模型以及传播模型结合，则可以直接读取计算结果。
- 背景噪声：典型的背景噪声包括了从临近电子元件或者无线电发射的热噪声或射电噪声（例如，车载无线电台、干扰电台或其他器材噪音造成的影响等，下雨天或其他天气情况的影响）。背景噪声包括：背景环境噪声（计算公式：环境噪声功率=带宽×功率谱密度）和背景热噪声（计算公式：热噪声功率=带宽×波尔兹曼常数×（背景温度+设备温度））两部分。
- 干扰噪声：干扰噪声描述了同时到达收信机的各个数据包间的相互影响。如果与天线模型以及传播模型结合，也可以直接读取计算结果。
- 信噪比：根据前面计算获得的接收功率、背景噪声和干扰噪声等参数来计算信噪比（SNR）。计算公式： $\text{SNR}_{\text{actual}} = 10\log_{10}[p_r/(p_b + p_i)]$ ，其中， p_r 接收功率， p_b 为背景噪声功率， p_i 为干扰噪声功率。
- 误比特率：为了精确仿真无线链路的误比特率（BER）特性，BER 的计算不是基于整个有效数据包的，而是基于数据包中的每一个小段（segment）来计算的。因为在数据包的传输过程中，信噪比不是固定不变的，从而导致误码率也

不是固定不变的。

- 错误分布：根据上阶段得到的数据包的一段段的误码率，即可计算出数据包每一段数据的误码数目，然后将它们累加起来即可得到总的误码数目。
- 错误纠正：错误纠正也就是根据错误的数目和链路模型的纠错门限，来判断数据包是否接收，也就是是否送交上层进行处理。

④ 有线链路模型

上面对无线链路模型的建模做了详细的描述。有线链路模型相对无线链路模型要简单很多，与无线链路最大的不同是：有线链路使用的是有线信道，而有线信道通常是平稳的。因此，对有线链路建模就不需要传播模型，以及天线模型，而只需对有线链路的收发信机建模即可。同无线收发信机的建模一样，有线收发信机也是采用首尾相连的管道阶段来完成的，只是它的管道阶段的数目没有无线收发信机中的多。

将有线链路分为点对点链路和总线型链路两种链路模型，然后分别建立对应链路的收发信机模型。

点对点链路是单点对单点的通信链路，因此它不存在干扰噪声，相应的收发信机模型也比较简单。点对点链路模型共有：传输延时、传播延时、错误分布、错误纠正 4 个管道阶段。传输延时、错误分布、错误纠正的计算和无线模型中相应的管道阶段是一样的，不同的是传播延时的计算，这里，传播延时等于第一个比特开始发送时间到第一个比特到达时间之间的时间间隔。

总线型链路是共享的，因此，相对于点对点链路来说，就稍微复杂一些。总线型链路模型共有：传输延时、封闭计算、传播延时、冲突检测、错误分布、错误纠正 6 个管道阶段。传输延时、错误分布、错误纠正的计算和无线模型中相应的管道阶段是一样的，传播延时的计算和点对点链路模型中的传播延时计算是一样的。封闭性计算就是判断各个接收点是否能够接受到此次传输。冲突检测是处理在某个包的整个接收时间内（第一个比特到达时间到最后一个比特到达时间之间的时间间隔），可能发生的多次传输事件，即遭遇的多次冲突事件。

2. 设备模型

设备模型是通过多个协议模型组成的，其行为由其使用的不同的协议模型决定，每个协议模型完成设备的一部分行为，如数据的产生、数据存储、数据的处理或选路和数据的传输等。单个设备模型通常由多个协议模型组成，通过数据包流或统计线可将不同的协议模型相连，其中数据包流承载了模型间的数据包的传输，统计线可实现对模块特定参数变化的监视，通过协议模型、数据包流和统计线的联合使用，完成设备模型的建模工作。

设备模型按照以下四个模块建模：源模块、核模块、链路模块和物理模块，如图 8.46 所示。每个层次的仿真模型及其相应层次仿真运行的特征均不相同，因此，整个仿

真试验系统将根据实际系统的各个层次的系统特征采用不同的仿真策略。这样的接口规范既为 4 个层次上的接口规范，并可完全基于标准的七层网络体系结构的功能和接口定义进行。

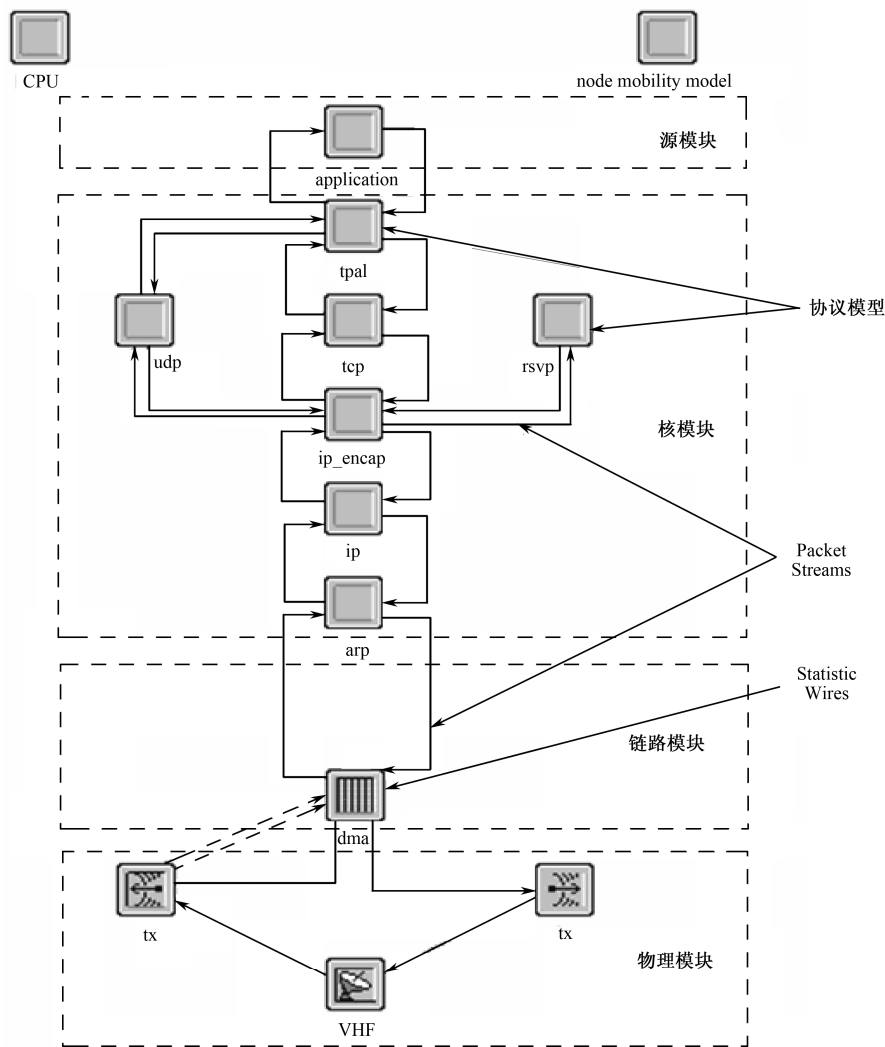


图 8.46 通用网元建模层次体系

源模块可以基于 OPNET EMA API 标准进行规范和定义，以支持多种业务流量的接入和适配。

核模块包括传输协议适配层 (TPAL)、传输层协议 (TCP/UDP)、IP 协议模块和路由模块 (如 RIP、OSPF 等) 以及基于 RFC 的其他标准模块。一些标准模块可以基于 OPNET 所提供的标准过程实现，而其他通信装备的专用模块需要自行开发。对功能相同

的模块可以通过设置 ON/OFF, 实现任意时刻仅选用其中的一个功能模块。

链路模块包括: VHF 电台、HF 电台、高速电台链路组网协议、多种链路特性(带宽、帧格式等), 在规范其标准对象模型模板的条件下, 链路层模块可任意扩展, 如标准的 TDMA、CSMA 无线接入体制可基于 OPNET 标准模块过程得到。

物理模块多为 OPNET 的标准发射机/接收机对, 这里只是使用它来读取无线信道模型计算的路径损耗结果。

在战术通信仿真系统中, 设备模型主要分为用户终端设备、传输设备和路由交换设备, 在设计它们的模型时, 可能不会用到通用网元模型的所有层次, 会根据实际情况灵活建模。

3. 节点模型

节点模型是由多个设备模型通过链路模型连接建立网络模型, 它是构建网络场景的基本单元。

在战术通信仿真系统中, 节点模型主要分为信息交换节点、指挥车节点、战斗车节点三类, 它主要是由交换设备、各种传输设备(微波接力机、短波电台、通用超短波电台、通用高速数据电台)以及终端设备构成, 在已经建立的节点模型基础上, 通过剪裁与修改, 可以引申出不同应用能力。节点模型的具体组成, 需要根据战术通信系统中真实节点的情况设计, 图 8.47 是一个节点模型的示意图。

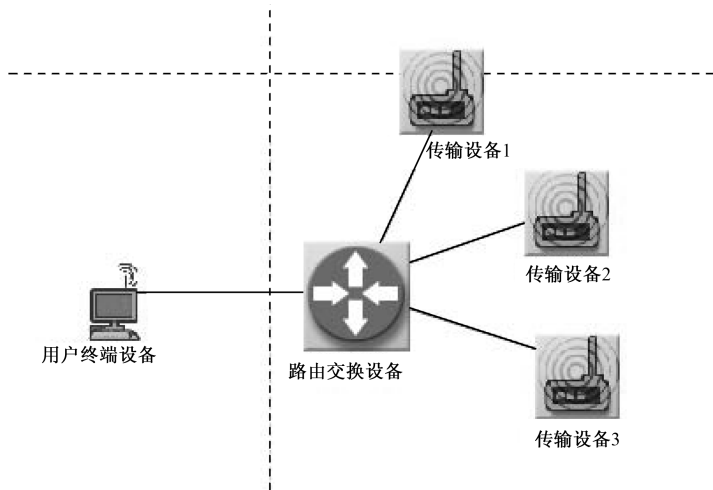


图 8.47 节点模型的示意

4. 网络模型

网络模型是由各个作战单元通过有线链路或无线链路互联而成的。网络模型与通信环境模型最终一起构建成仿真网络场景。

网络模型设计分为几个步骤进行, 第一步是确定网络规模, 第二步是确定网络节点组成和位置关系, 第三步是确定网络拓扑结构。

(1) 确定网络规模

在设计网络模型时, 要掌握仿真重点, 网络规模可以进行适当的压缩。由于是对通信系统进行仿真, 并不是所有的作战节点都需要设计在网络模型中, 而是选择与通信相关的节点, 并且不同的仿真目的, 网络模型的设计也不相同, 比如对顶层网进行仿真, 那对于以下层次的网络可以采用弱化的表现形式, 不用每个节点都模拟, 通过这样的手段突出仿真重点, 节省仿真资源, 解决仿真精度与仿真速度之间的矛盾。

(2) 确定网络节点组成和位置关系

在设计网络模型时, 要尽量忠于实际网络, 网络节点之间的位置关系、节点内的设备组成、有线链路的连接关系都要与真实世界尽量保持一致。由于是对战术通信系统进行仿真, 有可能很多网络构想在真实世界并不存在, 因此应该与用户仔细沟通, 明确他们的仿真目的和对网络的初步设计, 然后将其转化成为网络模型, 从而使网络模型既不失战术通信系统的网络特色, 又便于 OPNET 进行模拟仿真。

(3) 确定网络拓扑结构

网络模型的设计重点在网络拓扑的设计, 通用的网络拓扑类型包括星行网、环形网、总线网、树形网等, 在战术通信系统中, 这些拓扑类型都可能存在, 并且还存在于自己特有的拓扑设计, 因此网络拓扑非常复杂。

战术通信系统中的网络分为有线网络和无线网络。在仿真系统中设计有线网络比较简单, 节点之间的连接关系是可见的, 无论在设计和检验时都非常容易, 显而易见, 它的关键点是选择正确的有线链路类型。网络拓扑设计的难点在于无线组网, 无线电台之间不能通过链路拖拽的方式组网, 只能通过电台参数设置的方法来组网。对于战术通信系统这样一个节点繁多的系统, 工作量是非常大的, 容易出错, 并且设计完后进行检查也是很繁琐的工作。因此在设计无线组网时要注意三点, 一是保证同一网络中的电台类型一致, 战术通信系统中存在多种类型的电台, 如短波电台、超短波电台、高速数据电台, 它们的参数范围各不相同, 不能够混合组网, 在设计无线网络时选择电台时容易误选, 这点要尽量避免; 二是同一网络中的电台参数一致, 只有相同类型的电台设置为相同的参数, 才能够实现互通; 三是不同网络的电台参数不一致, 相同类型的电台可能组成多个不同的电台子网, 因此应事先为每个子网分配工作频段, 避免边设计边分配, 造成不同的电台子网使用相同的参数等。

通过以上三个步骤基本可以完成战术通信系统的网络模型设计。总的来说网络模型的设计是一个需要与用户沟通, 考虑问题繁琐, 工作量大的工作, 需要仿真开发者互相配合完成。

5. 网络流量模型

网络仿真最重要的两个模型：网络模型和流量模型。而流量模型是网络性能分析和通信网络规划设计的基础，精确的流量模型对设计高性能网络协议、高效网络拓扑结构、业务量预测与网络规划、高性能价格比的网络设备与服务器、精确的网络性能分析与预测、拥塞管理与流量均衡都有重要意义。OPNET 中提供了两种流量模型：前景流量（explicit traffic）和背景流量（background traffic）。

(1) 前景流量模型

前景业务流量模型是由 OPNET 网络仿真软件应用排列理论、概率模型等数学方法利用参数驱动的机制建立的模型。它对自定义流量的生成有着十分重要的作用。前景流量是基于数据包的业务，OPNET 采用离散事件仿真机制，它使每一个数据包都经历这个协议栈，对数据包在软件的处理过程、硬件的处理过程、信道的传输过程等都能够提供非常细致、全面的刻画，对各种业务可以获得精确的描述。建立一个完整的前景流量模型必须先对各业务分别建模，然后进行组合再进行分析验证，再修改，再验证。但是如何建立合理而又合乎实际的前景流量模型仍然是非常困难，需要在这方面做了许多细致而又有创新的工作。

(2) 背景流量模型

背景流量模型是采用统计分析的方法，使用特殊的带信号的包，告诉中间路由器背景负载量有多少，可能很长的一段时间背景负载才作一次调整，然后再次通知路由器。它避免离散事件仿真消耗大量的仿真时间，但是用这种方式得不到应用层上的表现。

表 8-16 是两种流量模型的一个对比表。

表 8-16 流量模型对比

	前景流量模型	背景流量模型
建模方法	排队理论、概率模型、纯离散事件，基于数据包	采用分析的方法，以不同的网络元素的状态信息建立流量模型
输入	源 IP（source） 目的 IP（destination） 时间间隔概率分布 包长概率分布 通过节点的属性（attribute）和 Application configuration 来定义，详细建业务建模	源 IP（source） 目的 IP（destination） 时间间隔 时间间隔内包的数目（packets）和字节总数 （1）从网络管理系统如 HP Openview 的 Netmetrix 读入采集到的流量脚本文件； （2）通过手工建立
输出	能得到各层次的详细统计数据	只能得到传输层以下的网络性能统计分析
建模方式	Application demands 方式 Application traffic models	Application demands 方式 Traffic flow 方式

续表

	前景流量模型	背景流量模型
特点	有复杂协议的影响 能得到各层次的详细数据资料 适于各种网络、应用模型和多种统计，如响应时间等 仿真时间相当长且消耗内存 流量的 Baseline 很难把握，难以体现网络的真实流量，尤其手工配置的工作量非常大	体现网络真实流量 仿真时间很短 尤其不能收集传输层以上的网络性能参数 网络仿真的效率高 流量采集困难较大
适用范围	网络协议性能分析 新研网络或无法捕捉背景流量的情况 区分业务，对传输层上的业务性能分析	网络吞吐量和带宽 网络的瓶颈在哪里 节点链路的失效分析 传输层下的网络性能分析
说明：由于无法获取实际网络中的背景流量，只提供了具有加载背景流量的加载能力，没有具体的模型。		

由表可以看出，前景流量模型和背景流量模型各有特点，选择哪种流量建模方式用于建立流量模型取决于仿真研究的目的。前景业务流量精确度高，但效率低，配置时间长。背景路由流量可以代表网络中的主要流量，但缺乏对特定业务的针对性。背景利用率流量可用来考察一些难以显性定义也不需要显性定义流量。为了充分利用前景流量和背景流量优点，我们采用前景流量和背景流量的混合方式来建立网络的流量模型，从而在精确性和效率之间取得平衡。得到既快速又精确的结果，称之为混合仿真（hybrid simulation）模型。它的主要特点是在背景流量之上叠加前景流量。

建立网络流量模型是网络仿真中最重要的环节之一，模型的好坏直接影响仿真结果的可靠性，但实际网络的流量是很复杂的，往往带有随机性，绝对完整精确地描述和建模是不可能的，因此必须通过分析提取其主要特征，合理利用各种流量建模方式，科学组合各种业务流模型，用尽可能有限的参数来描述，从而建立较准确的流量模型。

6. 网络通信环境模型

网络通信环境是模拟战术通信系统在通信过程中所处的环境，包括节点的移动状态、通信干扰环境和地形环境，以及设备的故障/恢复。

(1) 地形模型

地形可通过 USGS，DTED 或者 DTA 数据文件导入，也可以通过 GUI 来创建，创建的内容包括：自然地形、地区的植被特征、建筑物，以及与其相关的电容、电导率、地表的粗糙程度等。图 8.48 为一个作战部队的布阵地形场景。

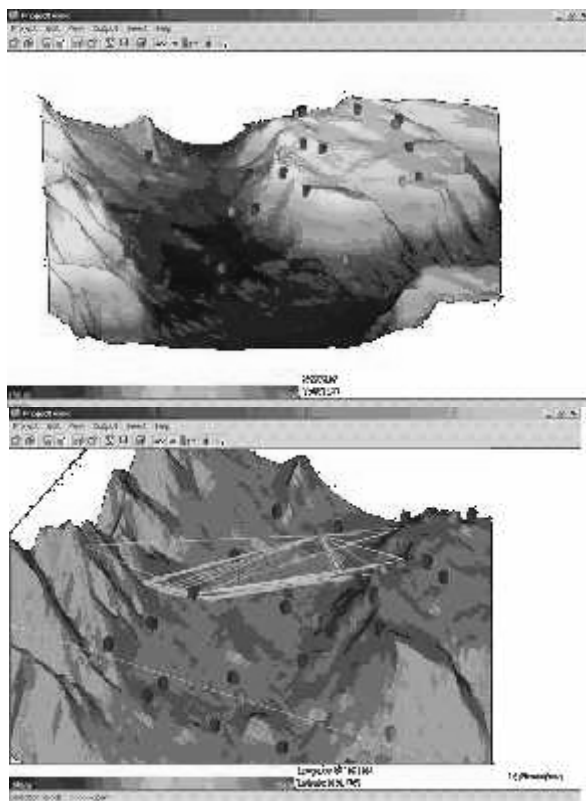


图 8.48 布阵场景地形

(2) 设备故障模型

由于战术环境的特殊性，在作战过程中肯定会出现设备的故障和作战节点的损毁的情况，要求仿真系统必须能够对这种状态进行模拟。在战术通信仿真系统中，可以使用设备故障模型，设定网络中指定的设备故障出现时间和故障恢复时间，来模拟网络节点或链路的损毁情况，设置方式如图 8.49 所示。

(3) 移动模型

仿真中对节点移动性的支持采用两种方式，分别是运动轨迹方式和进程模型控制方式。运动轨迹方式是直接在网络拓扑中画出节点在仿真中的运动路径，随着仿真时间的推进，节点将按照规定的轨迹路线改变自己的坐标位置进行移动。进程模型控制的方式是通过进程模型中的代码来直接控制移动节点的移动。

在战术通信仿真系统中，这两种方式都将用到，在作战过程中，大部分节点的运动趋势是一致的，可以采用子网设定运动轨迹方式来模拟，对单个节点的运动个性，可以采用子网内的战斗节点进程控制运动的方式来模拟。由于该系统网络规模非常大，在实际仿真中，可能会计算机资源不足的情况，到时，会根据情况尽量采用运动轨迹的方式以尽量减少事件数达到加速仿真和减少资源消耗的目的。



图 8.49 设备故障/恢复设置窗口

(4) 干扰模型

无线通信环境中的电磁环境会影响到无线信道的通信性能，无线电磁环境中影响无线通信质量的干扰因素很多，主要可以分为两个大类：自然环境电磁干扰（比如地形的、地质的电磁环境）、人为干扰。其中，自然环境中的电磁干扰因素已经在地形地理模型和信道收/发信机上体现（环境噪声和背景热噪声的计算）。本干扰模型主要是对人为干扰源进行建模。

人为干扰源根据干扰的方式和干扰的制式不同，干扰源对无线信道的影响也就不同。按照按频谱宽度划分，常用的干扰方式分有：瞄准式干扰、半瞄准式干扰、阻塞式干扰；按干扰信号的调制方法分有：键控干扰、音频杂音调制干扰、脉冲干扰、纯噪音干扰等。为了能够构建一个统一的干扰源模型，建立了一个如图 8.50 所示的模型。根据各种电磁干扰源的数量、种类、分布以及在不同的频率范围内功率或场强的分布等有关电磁作用状态进行分布和设置。

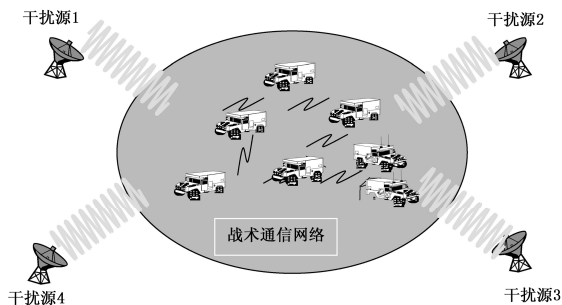


图 8.50 干扰源对战术通信网络的干扰

图 8.51 所示为一个干扰源的节点模型，干扰发射机节点向网络中引入了无线电噪声。和静止的发射机节点一样，它包含一个包产生模块，一个无线发射机模块和一个天线模块。它的行为和静止发射机一致，但是信道功率和信号调制方式不同（信道的功率和调制根据不同类型的干扰源来设定）。这些差别使得干扰发射机节点发送的包在接收机看来像噪声。

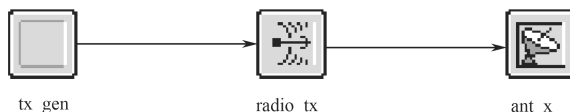


图 8.51 干扰源模型

8.4 仿真环境运行与控制

8.4.1 仿真规划管理

每一个网络仿真联邦成员都安装有监控服务程序，仿真代理程序与仿真主控的监控服务之间存在 C/S 结构关系。首先仿真主控在开始仿真试验之前对事先规定的端口进行监听，网络仿真联邦成员中的代理程序根据配置好的 IP 地址和端口，向仿真主控发起 Socket 链接请求。建立好 Socket 链接后，网络仿真联邦成员仿真主控发送本机的系统信息，包括本机 IP 地址，主机名、成员角色等，方便仿真主控的监控与显示。

操作人员在仿真主控上根据仿真目的进行仿真想定，生成仿真预案，通过控制管理总线对仿真预案进行下发，并对仿真联邦成员进行初始化。

仿真规划管理流程图如图 8.52 所示。

8.4.2 仿真数据交互

仿真数据的交互是通过 HLA 交互来完成的。仿真运行前，各个计算机仿真系统成员根据仿真想定，对仿真过程中可能产生的 HLA 交互数据进行公布和订购。进行仿真试验规划的时候，通过人机交互界面对本次仿真试验关心的数据进行选择，连同其他仿真预案信息一起下发到各个计算机仿真系统成员。计算机仿真系统成员根据选择的结果，在仿真过程中，把相关数据封装到 HLA 交互中，通过 RTI 传递给各个订购了该数据的计算机仿真系统成员。

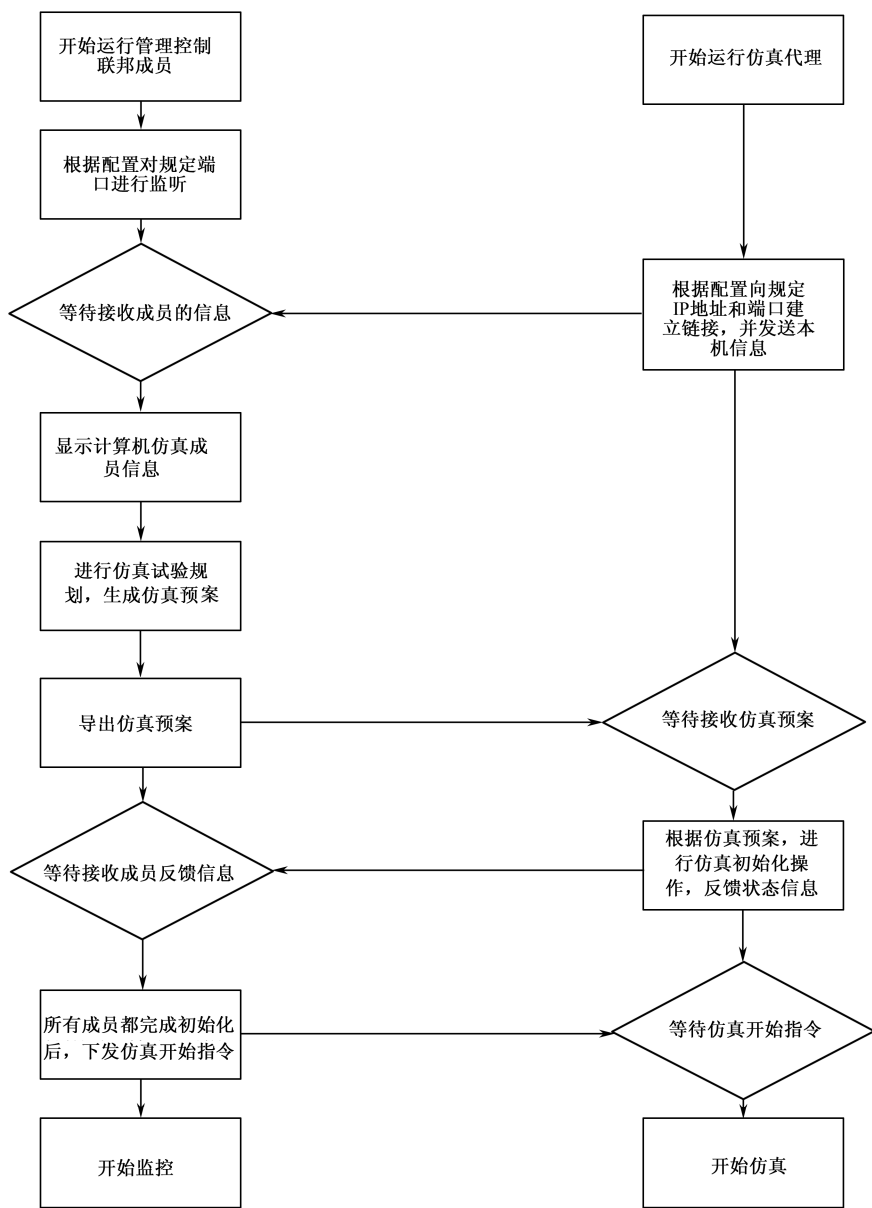


图 8.52 仿真规划管理流程

8.4.3 仿真结果统计

1. 性能指标

要对战术通信网性能进行定量的研究, 必须指定适当的网络性能指标。可以按照网

络协议分层的原则,分别从链路级、网络级、用户级讨论,也可以从网络资源利用、网络管理和网络服务的角度来讨论。由于我们着重于网络对各种应用的支持性能的研究,从网络用户角度进行系统级的分析,主要性能指标有业务端到端时延、吞吐量、丢包率。

(1) 网络吞吐量(单位为 bit/s)

网络吞吐量也称吞吐率,是指单位时间内节点之间成功传输的无差错的数据总量。它体现了通信网络的通信能力,是网络的一个统计特征。可以从节点吞吐量、网络总吞吐量和业务吞吐量等方面进行比较分析。

假设帧长固定,长度为 L 比特,且单位时间(单位设为秒)内成功传输的帧数为 n ,则吞吐量可表示为 nL bit/s(比特/秒)。通常,用信道传输速率 R 对吞吐量归一化,用 S 表示,即:

$$S = n \times \frac{L}{R} = nT$$

其中, $T = \frac{L}{R}$ 代表每帧在信道上的发送时间。

如果在信道上帧不发生碰撞,且帧间隙为零,信道将被最大限度地使用,这时 $nL = R$,即 $S=1$ 。相反,如果信道上所有的帧均发生碰撞,即成功传输的帧数 $n=0$,吞吐量达最小值 $S=0$ 。

本系统主要分析业务吞吐量,该指标的计算由业务层模型获得。计算公式为:

总业务吞吐量 = 周期业务吞吐量 + 突发业务吞吐量 + 话音业务吞吐量

影响吞吐量的主要因素有:物理链路质量、信道接入方式和网络拓扑结构。

(2) 时延(单位为 s(秒))

从报文开始进入网络/节点到它开始离开网络/节点之间的时间,分别称为网络时延、节点时延。一般说某个网络的时延都是指其统计平均值,这个值随网络系统的负载变化而变化,负载越大,其值也越大,因此一般给出其时延对负载率的变化曲线来说明某个网络时延性能的好坏。

本书主要关注节点时延,即业务的端到端时延,主要通过对业务的传输时间的计算获得。计算公式为:

$$R(n) = [T_R(n) - T_T(n)]$$

式中, $R(n)$ 是第 n 个报文的时延; $T_R(n)$ 是第 n 个报文的收到时间; $T_T(n)$ 是第 n 个报文的发送时间。

影响时延的主要因素有:传播时延、处理时延、排队时延。

(3) 丢包率

一般指丢失的报文占发送的全部报文的比。主要体现网络对业务传输的可靠性和成功率。平均丢包率指单位时间内没有得到正确传输的业务报文数与该段时间内产生的

业务报文数的比值。计算公式为：

$$\text{平均丢包率} = \frac{\text{某时间内业务发送的报文数} - \text{该时间内业务接收的报文数}}{\text{某时间内业务发送的报文数}}$$

影响丢包率的主要因素有：信道质量、数据链路层的流量控制和信道接入、路由。

2. 分布式仿真结果统计方法

以上给出的是仿真结果计算一般公式。对于在分布式仿真体系中，仿真的结果收集和计算需要有特殊的方式。数据服务联邦成员主要就是为分布式仿真系统统计结果的计算和存储而设计的，它作为一个数据收集和处理中心，完成一个汇总和处理功能。

(1) 吞吐量的统计方法

由各个仿真联邦成员统计本联邦成员的成功发送包的数量，由数据库服务器的数据采集中心完成一次求和，从而获得整个网络的吞吐量。所研究的特定的端到端吞吐量则由目的节点直接进行统计获得。

(2) 时延的统计方法

时延按照业务类型进行统计，对于每一个类型的报文在发送过程中，会经过多个节点中转（可能会通过多个联邦成员），业务在联邦成员间转发时会携带本成员中的时延，并每转发一次就累加时延，最后由最终节点接收到该报文后，获得最终的端到端时延，并将该时延发送给数据服务联邦成员，再由数据服务联邦成员对每类型的端到端时延求平均值。

(3) 丢包率

分布式网络仿真中，业务的源节点和目的节点可能不在一个仿真联邦成员中，所以每个联邦成员自身无法统计到正确的丢包率。因此需要由各个仿真联邦成员将本成员全部或指定节点的发包个数和接收包的个数进行统计，然后发送给数据服务联邦成员，由数据服务联邦成员进行计算，获得端到端或网络总体的丢包率。

8.4.4 仿真运行流程

在进行仿真试验之前，假设已经根据试验任务分析结果或已有的网络建立了目标仿真系统，整个仿真运行流程分为以下三个阶段。

1. 试验规划阶段

首先根据仿真目的建立作战应用与想定，并对想定进行分析和规划，并构建仿真系统的初步框架；然后对该初步框架进行细分，转换成可对仿真系统进行构建的设计输入和输出，并完成对要收集的仿真结果统计量的定制，以及对业务类型、业务的分布和业务流量的配置；接着，根据仿真的设计，由仿真系统完成对仿真场景的搭建，包括对通

信环境、层次模型、节点模型、网络模型等的构建以及仿真参数输入和仿真结果输出的配置等，准备运行仿真。如图 8.53 所示。

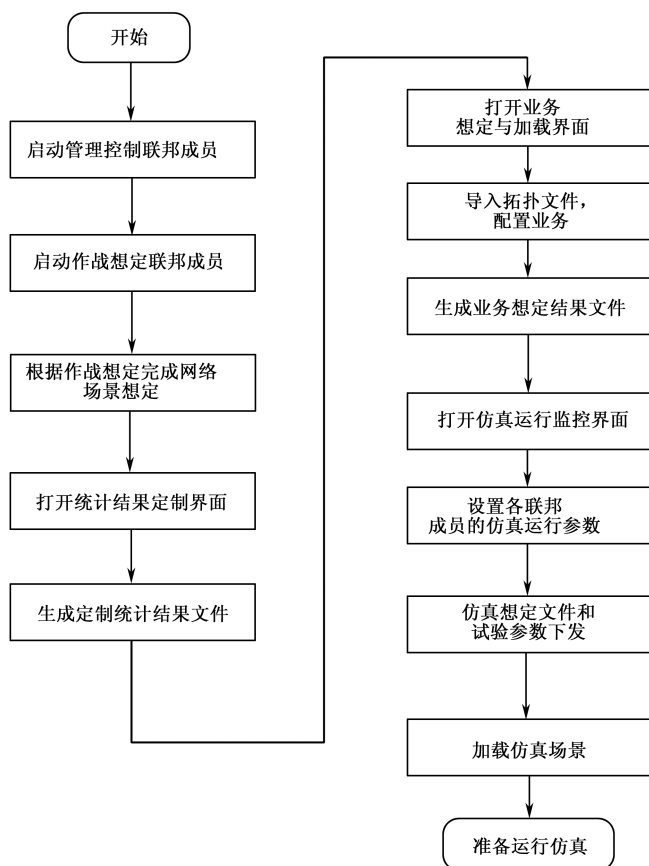


图 8.53 试验规划阶段流程

2. 试验运行阶段

在完成对仿真系统的搭建和准备后，开始运行仿真。仿真开始运行是在仿真管理控制联邦成员进行触发。此外，在仿真运行过程中，管理控制联邦成员控制整个联邦的运行，保证整个仿真试验系统的所有参试节点一致、协调同步进行，并根据需求动态监控仿真系统运行的态势，采取相应的策略进行调度控制，满足整个仿真系统的任务时限、负载均衡和通信开销等要求。根据仿真预案，仿真联邦成员内部以及仿真联邦成员内部与实物系统之间不断交互信息，实现联合仿真，以此来检验仿真对象网络的性能。数据服务联邦成员根据预先定制统计结果，实时收集网络运行参数和统计量，并进行分析和处理，由数据库系统对仿真运行数据和评估结果进行存储。如图 8.54 所示。

3. 试验数据处理阶段

试验运行结束后，由仿真主控停止联邦运行，由控制代理将各个仿真成员的本地数据上传到仿真数据库中，实物系统的统计数据也通过半实物接口传到数据库中。启动评估系统对仿真数据库中仿真统计结果进行分析处理得到评估结果。仿真试验是一个多次循序的过程，根据评估结果来调整仿真试验的设置、改进网络拓扑设计或者改进协议设计，然后再进行仿真试验再评估分析，最终获得一个可信、全面的评估结果。

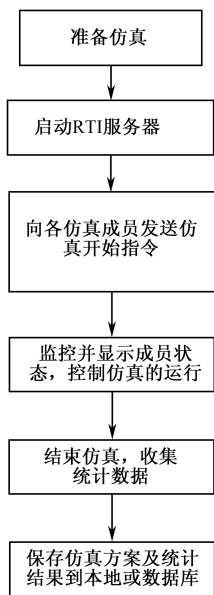


图 8.54 试验运行阶段流程

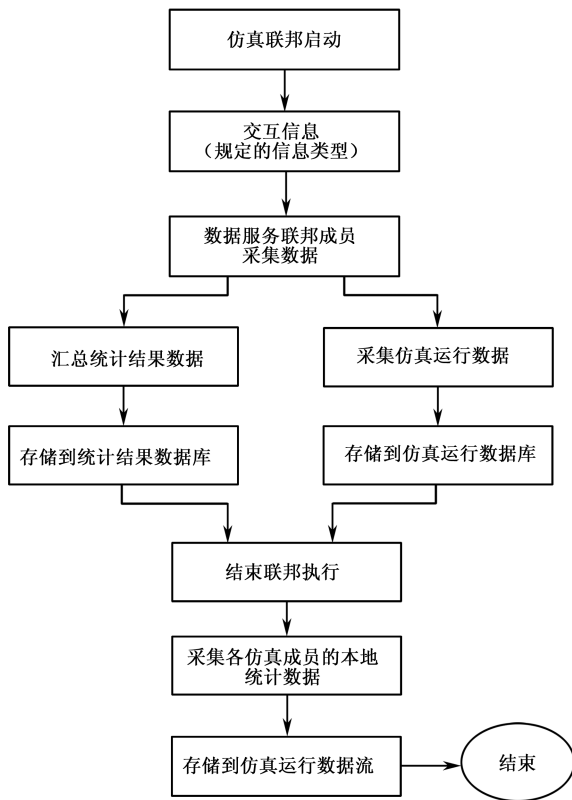


图 8.55 数据处理采集流程

第9章 战术通信仿真环境的应用

仿真技术以其机理的先进性、运用的广泛性、使用成本的经济性广泛应用于军事系统的装备发展全生命周期。战术通信仿真环境可为战术通信系统的发展提供试验验证环境和通用仿真试验床，可以应用在不同的场合完成不同的试验任务。本章介绍战术通信仿真环境在系统建设不同阶段的应用方向和方法。

9.1 主要应用方向

战术通信仿真环境提供了一套高可靠性、可信性、科学性以及易用性的工具与方法，它能为复杂战术通信系统的规划和设计、设备研发以及网络协议开发提供科学客观的工具，避免主观或经验的错误。与以往的仿真技术相比，基于 HLA 的分布交互仿真具有较大的优势，能够实现大规模的综合仿真、视景演示、作战训练等复杂功能，可以降低复杂大系统对人员素质的要求，提高仿真结果的可信性，减少人员投入，降低管理的难度和成本等。

战术通信仿真环境采用分布式仿真的体系结构并接入实物系统，尽可能地提高仿真的可信度与参与度，可以使无法准确建立数学模型的真实系统进入仿真回路，实现仿真系统到实际系统之间的信息流交互，从而可以极大地提高仿真系统的应用范围，并对部队的演示与操作训练等提供支持，是未来仿真系统的主要发展方向。战术通信分布式半实物仿真的主要应用方向如图 9.1 所示。

战术通信分布式半实物仿真中，实物系统与仿真系统可以灵活构建，从而满足不同的应用需要。仿真系统可以用来模拟新设备、新协议或新系统，也可用来模拟目前使用的系统或设备，而实物系统也可以是新设备、新系统或现存的系统或设备。分布式半实物仿真系统的功能包括：支持新型电台设备、新网络与系统等接入仿真系统，以评估该新型设备或系统与原有系统体系结构的综合性能；评估不同的系统形态对目前实际业务的支持度；评估不同系统之间的整体性能。

根据分布式半实物仿真的构建方式与构建内容，它的主要应用方向大致可分为以下几方面。

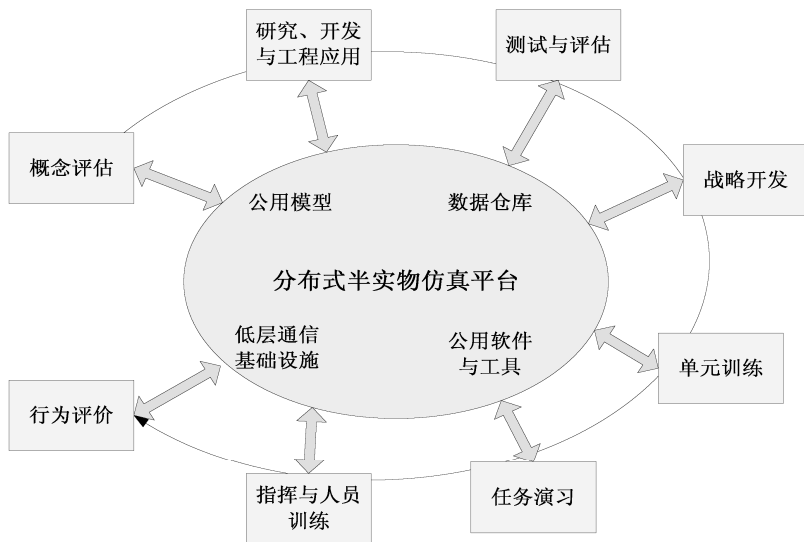


图 9.1 分布式半实物仿真系统的应用方向

9.1.1 开发、测量、压力测试

这是战术通信分布式半实物仿真的主要应用方向，涵盖了图 9.1 中的概念评估、研究、开发与工程应用、测试与评估等几个阶段。包括：针对原型硬件设备和软件产品进行开发测试和相互协作性测试，而不必为测试建立专门的实验环境，在不牺牲性能指标可信度与真实性的情况下，不必完全用实物来建立实验环境，从而节省投资；测试原型网络设备的可扩展性和相互协作性，并测试原型网络设备是否满足最初设计的要求；在原型系统中加入大量的虚拟节点，评估系统的可扩展性。

这方面的应用实例主要是在战术通信新系统、新协议或新设备的开发过程中。在这种应用方式下，仿真网络是实物系统的扩大，用来评估新系统、新设备以及新网络规模扩大后的联合使用性能，评估网络是否达到设计目标。同时，仿真系统可以不仅包含新系统设备，还可包含现存的系统，可用来研究两个分离的系统或设备（同构或异构）通过仿真系统进行互连互通后的作战使用效能，分析新旧系统之间的整体通信效能。仿真系统可以是旧有的系统，也可以是新研系统，甚至可能是未来的概念系统，从而可以全面分析实物系统与过去、现在或未来通信系统的作战通信效能，为新系统的研究提供科学的开发工具。

9.1.2 互操作测试

互操作性是系统、协议开发过程中的关键问题，特别是在系统原型的开发过程中，

如果没有科学客观的手段进行测试,单凭理论推导或经验,会极大地增加系统开发的风险,降低系统的整体效能。而且在系统开发过程中,也不可能建立实际的原型系统进行测试,因此通过半实物仿真系统来进行这项工作就显得极为合适。互操作性测试包括测试网络硬件或软件的原型是否满足可扩展性与互操作性,以及对标准的符合程度。

由于仿真系统的灵活性,战术通信仿真的实物系统与仿真系统都可单独构成一个独立的分系统,它们之间的设备、组网方式等既可以是相同的也可以是不同的。当两个系统的体系结构与设备不同时,就可以进行互操作性测试。同时可用来对新设备、新网络与新系统与原有系统的无缝组网的性能进行分析与评估,分析新旧系统之间的整体通信效能。这里的实物系统可以是单个的信道设备或互连设备,也可以是一个实际通信网络,甚至可能是一个指控软件系统,仿真系统可以是不同时期、不同体制的通信系统,也可以是仿真系统的不同成员。这些实物系统与仿真系统的不同构成可以达到不同的使用目的。

9.1.3 模型有效性测试

在仿真开发过程中,新模型、新协议的有效性往往难以进行真实的评估,而通过战术通信分布式半实物仿真,可以在仿真环境中部署一个新开发的协议,将现实的流量注入仿真环境,然后分析该协议或模型的性能。

在战术通信系统的整个研制过程中,验证系统服务质量和各类性能指标以及能否满足用户要求,验证和评估系统方案的优劣,协助和优化系统设计,为战术通信系统的设备与系统的性能分析与评估提供可靠的工具,从而评估系统协议与模型的有效性。

战术通信仿真环境基于 HLA 分布式半实物仿真体系结构进行搭建,采用面向对象的技术对仿真模型进行建模,充分利用 HLA 的特点,使整个仿真系统具有很好的可重用性和互操作性。另外,这种基于 HLA 的仿真体系结构,具有很好的扩展性,可以根据需要进行仿真应用或联邦成员的增减,建设不同的仿真系统规模。因此,以它作为指挥自动化系统的模型测试平台,具有较强的通用性与有效性。

9.1.4 接入实物系统,支持系统联试

战术通信分布式半实物仿真通过接口控制计算机将实物系统与仿真系统互连,可以对新型设备的性能和功能进行测试和验证,用于系统级联试,克服实际系统联试时存在的联试规模小和性能测试时间长的缺点。此时仿真系统是实物系统的虚拟扩充系统,实物系统是大型系统全部定型前的小型示范系统,两个系统的体系结构与设备一样,可用来评估系统规模扩大时的各种技术体制的效能,用来检验大型系统是否达到了设计规模与设计效能,降低系统的开发风险,降低成本。

9.1.5 与网管结合

与网管的结合是战术通信仿真未来的应用目标。通过将仿真系统与网管系统的结合,可实现对网管的网络规划、网络配置、网络重组、网络组织运用以及拓扑结构设计提供性能依据与优化手段,提供类似于网管专家系统的功能。

通过将网络的规划、配置或拓扑文件导入仿真系统,仿真系统可构建与之对应的虚拟网络,从而可以评估出该规划或配置方案的优劣。通过半实物系统,可将原型业务引入到虚拟网络中,研究在该业务特性下网络的最佳构成,从而指导网络的规划与设计。通过对某些特殊作战应用的仿真与预测,可以设计出网络在特殊战场环境或未来紧急态势下的应变预案,从而能发挥出网络的综合效能,提高应变的速度与效率。

9.1.6 模拟训练系统开发与部队的演习

战术通信仿真环境可以作为部队通信人员的培训工具,通过对某些通信过程、网络组织运用方式、网络配置以及对应的性能特性等的动态展示,对部队通信人员的模拟训练学习提供一种科学的手段。

在未来还可通过增加三维视景演示系统,以三维视角和听觉直观立体地演示网络通信系统的组成结构、工作过程和方式以及系统各性能指标,对它的主要技术体制、组织运用方式与技术优势进行直观的演示。这样整个系统不仅可以作为一个仿真系统平台,而且可以作为演示汇报系统,可以作为战场通信系统相关的技术培训与模拟训练工具。这样,战术通信仿真可实现从三维真实地形中通信平台的布置、通信系统的构建、性能的评估、网络配置参数的生成与下发,到不同环境的组织运用、紧急情况下网络的应对、战场环境下信息对抗等全过程的演习以及展示。

9.1.7 仿真技术开发

通过对分布式仿真技术、交互仿真技术、半实物仿真技术以及军事应用方面的研究,可以促进战术通信仿真在仿真建模技术、仿真管理与控制技术以及作战应用等方面的研究水平,提高我军对先进仿真技术的开发与应用水平,提高建立战术通信仿真环境的基础研究能力。

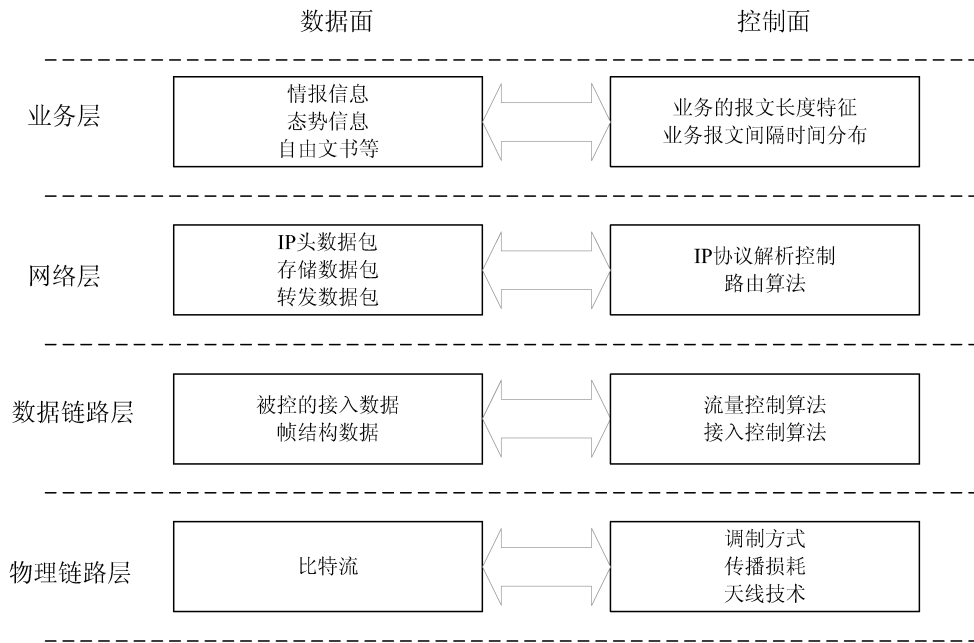


图 9.2 协议模型层次

网络模型是基于数学矩阵描述网络拓扑状态的一个数学模型^[23]。本模型能够结合协议层模型一起来进行网络性能的分析。根据网络设计配置网络的链路情况、节点的分布以及组网的规则、路由算法以及约束条件等。根据战术通信网络业务特性，通过业务层模型来输入业务流量。通过物理链路模型、地形模型计算信道的不可纠正错误码率，对比信道的错误门限来确定物理链路的通断状态。根据数据链路层模型计算报文中间的接入时延，根据路由算法，确定业务模型输入业务的选路情况，并确定分组丢失率，最终计算业务的端到端的时延、时延抖动性能以及丢包率等指标。

对网络进行仿真和性能分析，首先是利用图论、排队论或其他的数学理论对网络建立合理数学模型，能够进行性能分析评估；再用面向离散事件的系统仿真的策略进行仿真，之后进行性能分析评估和仿真试验评估。评估网络协议所确定的存取方式、流量控制、信道接入、差错控制等网络对性能所产生的影响。

9.2 仿真在战术通信系统设计中的典型应用

网络通信系统设计通常采用自顶向下的设计方法，图 9.3 给出了战术通信系统设计过程中，仿真在各个阶段的具体应用。其中原型系统通过对核心技术和核心设备建立原理样机，以综合集成和联试方式构建，在不影响技术体制和系统架构验证的前提下忽略

一些次要部分或无需进一步进行技术验证的部分，主要目标是验证顶层设计的科学性，验证技术体制和关键技术的创新性、合理性与可行性。仿真系统通过对战术通信系统架构和技术体制的仿真建模，对难以通过原理样机进行验证的新技术进行仿真模拟和探索，对多个系统体系结构设计方案进行评估和对比分析，测试不同作战应用部署和作战环境下的系统性能，并可进行纵向的对比仿真分析，为顶层设计的优化提供支持。此外，通过原型系统与仿真系统的互连互通互操作构成分布式半实物仿真环境，解决原型验证系统规模受限以及纯仿真系统真实性不强、可信度不高的问题，最终构建一个支撑系统设计的半实物仿真验证平台，对系统架构、系统组成、系统的工作过程、协议交互流程以及系统性能进行详细的综合分析和呈现。

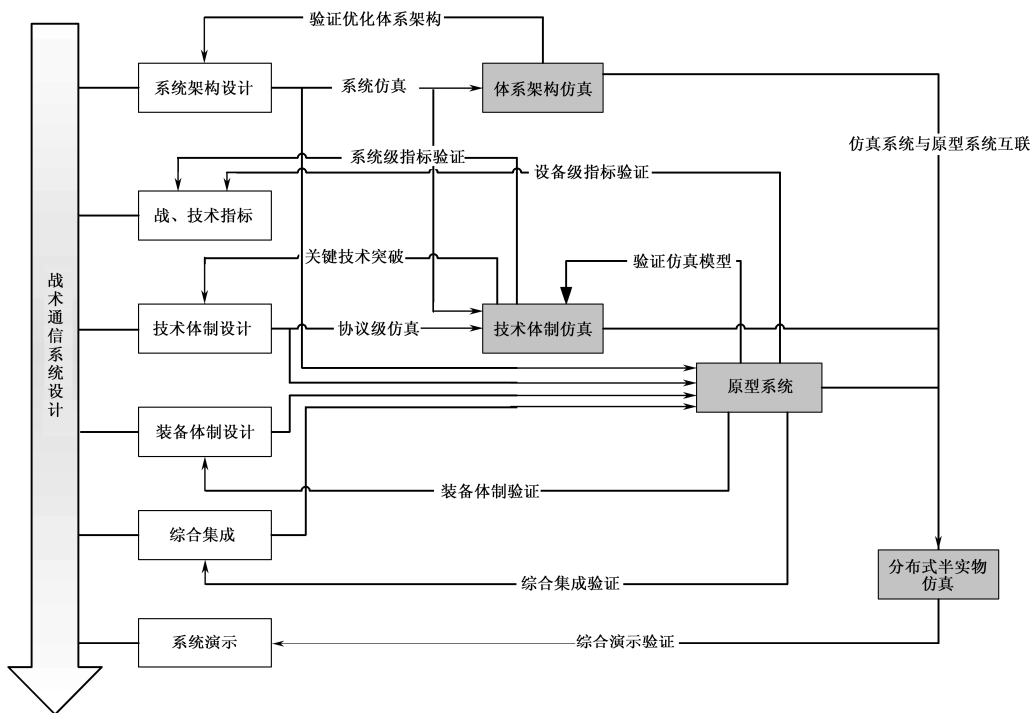


图 9.3 系统设计与仿真的关系

仿真系统能够应用于：前期的战术通信网规划设计以及相关技术前期论证；系统建设期的网络性能指标的验证；系统运行期的系统优化和改进等多个方面。网络设计实际上是一个优化过程，基于本仿真系统能够实现：网络拓扑结构设计、网络开销设计、网络容量设计、网络路由设计、网络可靠性设计和网络性能分析等几个部分。

9.2.1 基于仿真的网络设计应用

仿真系统的应用与系统的设计方法一样,都采用自顶向下的设计方法,这与传统的仿真系统的构建方式完全不一样,而且系统的设计是在系统仿真的基础之上,通过系统仿真来获得系统设计的技术依据与约束条件,大大提高了系统设计的科学性与客观性,提高了仿真系统的作用。

使用模型:网络模型、业务层模型、物理模型与地形模型等。

应用过程:

- ① 把目标网络的战术能力要求、性能指标要求作为输入。
- ② 确定网络设计的物理条件,包括网络通信环境、基本物理链路指标、网络的规模和组织规则。这些作为网络模型的基础配置条件。
- ③ 基于网络模型进行仿真,最后获得一个优化的网络规划设计方案。
- ④ 对设计方案进行验证,加入业务模型、物理模型与地形模型,初步验证方案的可行性。

9.2.2 网络关键技术的仿真应用

战术通信网要能适用于网络节点移动性强、网络覆盖地域范围大、网络通信业务种类繁多、指控信息要求实时性高、情报信息多为长报文、传输可靠性强的使用特点。战术通信网关键技术设计需要研究各种技术在具体使用环境下的性能,因此在进行实验时,要根据网络模型,采用自下而上的方式来进行研究,即要先构建下层的基础平台,再对平台之上的技术进行研究。战术通信网主要对物理信道的性能要求、信道的接入设计、网络路由设计、网络拓扑分析等关键技术进行分析研究。

(1) 物理信道的性能分析

物理信道的性能分析需要物理层模型(包括传播模型)以及地形模型结合来实现。

使用模型:地形模型、物理层模型。

应用过程:

- ① 地形模型和地理位置作为输入,通过传播模型计算出路径损耗。
- ② 然后由物理层模型以地理位置、路径损耗以及收发信机的频率、信道带宽和功率作为输入,计算输出误码率。
- ③ 根据不同的地形模型和距离分析信道的误码率是否能够满足战术通信的指标要求。

（2）信道接入性能分析

信道接入的设计需要根据物理信道的性能特性（信道速率、信道带宽）、承载的数据特征（流量模型）以及子网络可支持最大的节点数作为输入，来分析信道接入时延、信道接入缓冲队列长以及信道冲突的情况。

使用模型：地形模型、物理层模型、信道接入模型、网络模型。

应用过程：

- ① 通过物理层模型和信道接入模型构建节点。
- ② 根据网络模型构建节点的子网与仿真场景。
- ③ 以数据业务流量模型作为输入。
- ④ 选择不同的信道接入模型（ALOHA、CSMA/CA、TDMA），统计分析信道的接入时延、信道接入缓冲队列以及信道冲突的情况。

（3）路由协议性能分析

路由协议的功能要求能够动态实时地建立路由表，及时有效地反应网络拓扑的动态变化，适应战术通信网自组织、自适应的要求，满足战术环境的通信要求。路由性能受到网络规模、网络拓扑结构、组织运用方式、移动性的影响。

使用模型：地形模型、物理层模型、信道接入模型、路由模型、网络模型、移动模型。

应用过程：

- ① 在已定物理信道模型和信道接入模型的情况下，选择路由模型，一起组合构建网络节点模型。
- ② 根据网络模型构建路由域的网络分布和网络拓扑。
- ③ 选择移动模型，分析在网络拓扑发生变化的情况下，路由开销、路由收敛的情况。

（4）网络拓扑分析

在确定了网络关键技术的设计后，需要根据战术通信系统的战术布置特点（部队的编制和编成编组），构建几个典型网络拓扑应用方式对网络性能进行深入的分析研究。

使用模型：地形模型、物理层模型、信道接入模型、路由模型、网络模型、业务模型。

应用过程：

- ① 在选定好底层协议模型的基础上，根据典型网络拓扑结构构建网络仿真模型。
- ② 在业务模型上配置业务参数。
- ③ 在节点上选择不同的业务分布和业务负载作为输入。

- ④ 分析网络模型的输出业务的吞吐量、延迟、延迟抖动、丢包率等网络性能。
- ⑤ 根据以上网络性能分析结果来调整网络拓扑设计。

9.2.3 网络性能指标的仿真验证应用

通过由底层到顶层的网络关键技术的仿真分析,制定出网络总体设计方案。在此基础上对网络进行战术性能和网络性能的仿真分析,来验证整个系统的可行性和可信性。

使用模型:地形模型、物理层模型、信道接入模型、路由模型、网络模型、业务模型、移动模型、干扰模型、地形模型。

应用过程:

- ① 根据协议设计和网络模型设计构建网络仿真模型。
- ② 除这两个内部因素影响网络的性能外,外部的网络通信环境也影响网络的性能,所以引入移动模型、干扰模型、地形模型作为变化的条件。
- ③ 通过业务模型配置不同的业务分布和负载作为网络的输入。
- ④ 运行网络模型,进行网络性能的分析,网络模型的输出为:吞吐量、延迟、延迟抖动、丢包率等。
- ⑤ 针对性的分析,战术通信网的指控网对实时性的要求比较高,要求网络能快速反映用户的请求,信息传输的延迟要尽可能小,因此指挥网要选取的主要性能指标为:传输时延、发送时延、端端延迟及响应时间等。情报网传输的信息量比较大,但对实时性的要求相对不高,因此选取的主要性能指标为:吞吐量、容量、丢包率等。通信网要反映网络资源的利用情况,因此要选取的主要性能指标为:吞吐量、容量、资源利用率等。

9.2.4 基于网络仿真的系统优化应用

在网络关键技术分析与设计、网络性能分析与网络设计验证后,战术通信系统设计已经基本定型。在此基础上,通过总体网络性能分析,自上而下调整网络的设计和使用。

使用模型:地形模型、物理层模型、信道接入模型、路由模型、网络模型、业务模型、移动模型、干扰模型、地形模型。

应用过程:

- ① 根据战术通信网的指挥自动化应用,对网络进行仿真,综合利用各种仿真结果,分析网络的薄弱环节,评估网络的作战效能。

② 根据分析结果，在满足战术应用的基础上，优化网络拓扑结构设计，提升网络性能，使它能提供更好的网络性能和战术性能。

③ 对网络关键协议技术的改进优化，使其更适合上层应用的需要。

从整个系统应用策略来看，应用过程基本上是一个自上而下，自整体到局部的一个基于仿真的网络设计，并且在验证和系统优化上，又是一个反向的过程。整个应用过程应该是一个闭环的基于网络性能指标负反馈循序渐进的网络设计修正过程。

第 10 章 战术通信仿真技术的发展与展望

随着仿真及其相关技术的飞速发展,未来仿真技术呈现数字化、智能化、虚拟化、集成化、网络化、协同化等特征。

(1) 数字化

20 世纪 80 年代以来,数字仿真在计算机仿真中独占鳌头,当代仿真的数字化特征自然是广泛采用数字仿真。当代仿真的数字化特征,还有一个新鲜含义:数字模型(Digitalmodel)。自从美国原副总统戈尔提出数字地球(Dig2ital earth)的概念以来,世界各国都在积极开展数字城市(Digital city)研究与建设,我国也不例外。接踵而来的,还有数字流域、数字校园、数字实验室、数字人体、数字生命、数字生态环境,诸如此类的数字模型雨后春笋般地涌现。这样一来,仿真数据格式多种多样,仿真数据文件类型也是五花八门,诸如文本、图形、动画、三维模型、分析模型文件(几何及结构分析模型信息)、标准数据格式(用于模型文件到分析模型文件的转换)求解文件、结果文件、模态中性文件(将有限元模型导入系统分析模型所需的文件)、报告文件等。针对这些数据文件的特点,势必采用多层次仿真数据管理办法。通用而又实时的仿真数据库及其管理系统,显然就是一个仿真基础设施。目前,国内外都在积极研究。

(2) 虚拟化

新兴的虚拟仿真,实际上,也就是含虚拟样机的数字仿真。它是数字仿真融入虚拟现实(VR)技术后的自然产物。众所周知,一个典型的虚拟世界开发系统通常采用这样的概念模型,其最底层是各种开发工具软件包,它们为构建一个虚拟世界提供了基本的支持。这些工具通常包括图形建模软件与开发环境、网络通信软件、语言开发环境、通用的应用程序框架和基本几何图元库等。上一层为对象建模语言,它为虚拟环境中的实体提供了一个一致性的描述模板,用来说明环境中实体的几何属性、物理属性及行为属性。虚拟环境管理器和环境描述语言,处于该概念模型的最高层。环境描述语言说明了虚拟环境的特征,虚拟环境管理器根据环境描述语言中对虚拟环境特征的描述对整个虚拟世界进行控制。

虚拟仿真在推动高新技术发展和支持四个现代化建设方面的作用日益明显,大受欢迎。目前 VR 的应用均属于微观决策问题一类,它不太适用于宏观决策问题。其原因,主要是宏观问题不易建立三维模型,而且宏观决策关注的不是细节问题,即便能建立抽象化的三维模型,对于解决问题的意义也不大,或许只是增加一些趣味性,倒不如二维

模型来得直观而又快捷。VR 系统的另一大问题是“迷失”，在虚拟世界中移动时经常容易不知所处何处。故在虚拟世界中经常需要二维地图的导引。最后还有一点，VR 系统是实时的（或伪实时的），不能用于非实时仿真。

（3）智能化

诸如专家系统、模式识别、神经网络、模糊控制、智能体和多智能体系统等人工智能技术渗透到仿真技术中，就出现了智能仿真。智能仿真在其应用领域都发挥出神奇的作用。目前数学描述不了复杂系统的层次性和复杂性，有待数学进一步发展。国防科大航天与材料工程学院于 2003 年指出，根据“适应性造就复杂性”，用多智能体系统研究复杂系统，可使仿真摆脱目前“无米之炊”的困境。

（4）网络化

计算机网络的优点是：用户突破了地理条件的限制，方便地使用远地的计算机；由于资源公用，避免了重复投资；可充分利用各地资源的特长，实现协同操作；可实现几个系统间的数据传输和实时管理。网络控制系统是近十几年发展起来的一种新型控制系统。网络仿真（NS）和网络控制系统（NCS）仿真，目前进行得十分红火。

对通信网络仿真主要有两种途径：①用一组方程描述网络特性，然后用计算机语言通过编程，实现对通信网络仿真；②借助已有的网络仿真工具进行仿真。前者难度大且通用性不好；后者无需大量编程，通用性好，很容易实现通信网络仿真，代表了通信网络仿真的发展方向。

国防科大航天与材料工程学院于 2007 年选用控制器区域网（CAN）总线做控制网络，对飞行器 NCS 进行了深入研究，并明确指出，对于短时延 CAN - NCS，其时延基本不影响飞行器的运动，但对带宽较高的种种机构将产生明显影响。为确保飞行器 NCS 的整体性能需研发有别于传统的控制策略和方法：若保留原控制器，可采用增益调度法来改善系统性能；最好是设计全新的控制器，针对不确定的时延和网络负载，鲁棒稳定的可行解可确保闭环系统稳定，且对外干扰有抑制作用，针对种种情况分别采用相应的自适应控制器均获得了很好的控制效果。

（5）集成化

集成，目前是一条重要的技术途径，它也能产生自主创新成果。许多仿真应用领域的仿真系统就是集成的产物。

在本质上，Web 服务（Web Services）很适合用来实现集成，其底层一般与 HTTP 协议绑定，能透明地穿透防火墙，因此特别适合于企业对企业集成（B2Bi）。现在 Web 服务用于集成还处于发展过程中，在安全性、分布式事务处理、工作流、商业流程方面还缺乏统一的规范，以 Microsoft、IBM 为首的公司正在制定相应的规范提交万维网联盟（W3C）讨论。

当前也只有与 Web 兼容的技术才能满足不同类型仿真应用的需求。DIS 中的一切都可以被建模为 Web 服务，包括各种模型、仿真系统、联邦成员、联邦，甚至是真实系统

(如 C4ISR 系统)等,这些对于用户而言都是透明的,资源的异构性被统一的接口所屏蔽。这些被 Web 服务封装的仿真资源就称之为仿真服务(Simulation Services)。国防科大机电工程与自动化学院于 2006 年在可扩展的建模与仿真框架(XMSF)基础上,结合 SOA(Service oriented architecture)和 Web 服务技术,给出了一种新的基于 Web 的仿真系统设计方案,即基于 SOA 的仿真服务系统(SOA-based simulationservice system)。

(6) 协同化

协同化仿真是一种处于不同地点、基于不同计算机平台的仿真人员采用不同建模方法建立混合异构层次化仿真模型,并在分布式环境上进行仿真运行、表现和分析的复杂系统仿真方法。目前较为通用和流行的实现多领域协同仿真的方式有以下三种:①联合仿真式(Co-simulation),不同仿真软件在各自运行前进行数据耦合关系定义并建立连接,仿真开始后,耦合的仿真数据通过进程间通信或网络通信的方式实现双向交换和调用。②模型转换式(Model transfer),将一个仿真软件的模型转化为另一个仿真软件支持的特定格式的包含模型信息的数据文件或动态链接库文件,实现模型级别的协同仿真。③求解器集成式(Solver convergence),实现两个仿真软件之间的求解器集成,在其中一个仿真软件中可以调用另一个仿真软件的求解器,从而完成协同仿真。

近年来,由于通信网络日趋复杂、网络规模日趋庞大,网络仿真技术应用于战术网络规划和设计的需求日渐强烈。因此,网络仿真系统的应用和开发重点转向网络规划和设计方面,将用户由原来的研究开发人员转向网络规划和设计人员,简化软件界面和操作流程,强化软件的工程应用能力,特别是加强了与网络管理软件的合作,开发与网管软件的接口,使得网络模型的建立逐步自动化,加快网络建模的速度。

不过,网络仿真技术在网络规划和设计方面的应用时间还不长,特别是在大型网络和复杂网络的应用方面,还处于应用的初级阶段,尚有不少重要的技术问题有待解决。网络仿真设计软件的使用和操作还相当复杂,还远没有达到一般网络规划设计人员经过短时间培训就能够熟练使用的目标。

在战术通信仿真方面,未来战术通信系统建模与仿真技术的总的发展趋势将由单机仿真向分布式系统仿真方向发展,包括远程异地的分布式仿真系统的互联;逻辑时间上的系统仿真向实时的交互式系统仿真方向发展;单一的通信网络系统仿真向综合(C4I)应用系统(作战训练与演示)仿真方向发展;完全基于仿真工具构建的仿真系统向与实物系统进行结合的方向发展。

综上所述,战术通信仿真的发展主要可分为以下几个方面:

(1) 体系结构

体系结构由过去的集中式、封闭式发展到分布式、开放式和交互式,构成可互操作、可移植、可伸缩及强交互的分布式协同仿真体系平台,通过建立通用的数学模型与仿真模型,从而构成通用的仿真平台,通过对平台的扩展与修改,以适应不同战术通信网的需要。

随着 HLA 分布仿真应用的进一步深化,大规模、细粒度、长时间的分布仿真对系统的计算能力、可靠性、容错性的要求越来越高。单纯基于 HLA 架构的仿真系统存在计算资源利用率低下、容错能力不足的问题,并缺乏动态负载平衡能力、海量数据难以存储和有效处理、仿真应用部署繁琐、仿真应用间协作和互操作机制缺乏等问题。

网格是互联网上的一种新的信息基础设施,伴随着互联网而迅速发展起来,被誉为下一代 Internet。通过高速互联网,网格将分布在不同地理位置的资源集成起来,为各种应用提供一种充分共享、无缝融合的资源使用环境。在结构上,网格是硬软件的结合体,其构成既包括物理上的网络和资源,又包括逻辑上的中间件系统,两方面内容缺一不可,共同组成了一个完整的网格系统,能为人们提供更强大、更便利、更高级的问题求解手段。

将网格技术应用于分布仿真,利用网格体系结构所具有的分布性、标准性、开放性和高可扩展性等特点,能较好的解决 HLA 框架中存在的不足。

(2) 功能与应用

仿真系统的功能由原来的单一系统或技术的性能仿真,发展到系统体系结构的设计与开发,发展到复杂环境下以系统为基础的体系与体系对抗仿真,实现系统功能的重用。应用范围从只作为系统性能验证的工具逐渐向系统开发的全过程应用发展,向系统的概念验证、系统研究、系统设计、关键技术开发、系统验证等多方面的应用发展。根据通用的数学模型所建立的系统仿真模型为不同应用提供基础。

(3) 构建方式

原有仿真系统总是先构建系统的各要素,然后再构建系统的总体网络,但网络中心战要求重视系统整体性能的提高而不专注于单个技术或指标的优越,先进的战术通信网设计方法也更加重视系统的顶层设计,这也带来了仿真系统构建方式的改变。应先建立系统总体的模型,然后对系统总体模型进行层层分解,最后确定具体模型的约束条件。同时仿真不仅仅作为某一方面的应用而建立,因此在构建仿真时应考虑系统的通用性与多功能性。针对战术通信网,应首先构建通用系统网络模型与各层通用算法的模型,在此基础上,根据不同的网络结构、战术应用、技术特点来开发不同的网络协议,实现同一个模型对系统开发全过程的支持。

(4) 运用模式

仿真系统由只能从系统外部观察仿真的结果或直接参与物理系统的测试,发展到能参与到系统中,与系统进行交互作用。系统的模型在建立时,除了要考虑通用性之外,还需要考虑真实性与可交互性。在建立系统模型时,模型的构建方法必须要符合实际的使用环境,每个模型要充分考虑实际环境与模型之间的相互影响,参数要齐备,模型不应是孤立的,符合标准的接口与模块化的要求,在更换算法时不应互相影响。

战术通信仿真技术是研究、分析、验证、设计和评估一体化军事通信网络的有效工具,随着战术通信网络规模和复杂性的提高,网络建模与仿真技术将发挥越来越大的作用,同时建模仿真技术的研究与发展将直接标志着通信网络设计与应用的层次水平。战术通信仿真是一种相当复杂的协同式仿真,需要在现有的仿真中实施数字化、虚拟化、智能化、网络化、集成化和协同化方可圆满付诸实施。这是进入 21 世纪以来的一项富有战略性的任务,需要我们不断的探索和实践,探索出一套适合我军通信系统需要的战术通信仿真发展的道路。

参 考 文 献

- [1] 范喜全. 战术互联网仿真技术研究, 北京理工大学博士论文, 2007
- [2] 谭齐, 田永春, 莫娴. 战术通信网仿真与评估技术研究, 第五届军队信息化工程建设工程与技术研讨会, 2008
- [3] 郭斌, 谭齐. 基于仿真的复杂通信网络设计方法, 信息安全与通信保密, 2010. 7
- [4] 王猛, 孟小波, 陈伟. 美军战术通信网络发展简介, 电子对抗, 2007.3
- [5] 鲁云. 基于仿真网格的多联邦仿真场景自动部署研究, 华中科技大学硕士论文, 2007
- [6] 李伯虎, 柴旭东等. 一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台“云仿真平台”, 系统仿真学报, 2009.9
- [7] 刘芸, 顾晓鸣, 匡晓. 一种基于 OPNET 的网络半实物仿真方法研究, 软件导刊, 2009.2
- [8] IEEE P1516.1, Draft Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) – Federate Interface Specification
- [9] IEEE P1516, Draft Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) –Framework and Rules
- [10] High Level Architecture Interface Specification, V1.3, Defense Modeling and Simulation Office, April 1998, <http://www.dmsomil>
- [11] 陈丽, 冯润明, 姚益平. 联合建模与仿真系统, 电光与控制刊物, 2007. 8
- [12] 曹星平, 吴红, 杨峰, 朱一凡. 分布式仿真实验设计技术研究, 系统仿真技术, 2009. 4
- [13] 张鹏. 分布式仿真试验管理关键技术研究, 国防科技大学硕士论文, 2007. 11
- [14] 金伟新. 大型仿真系统, 电子工业出版社, 2004
- [15] 陈敏. OPNET 网络仿真, 清华大学出版社, 2004
- [16] 郭齐胜, 张伟, 杨立功. 分布式交互仿真及其军事应用, 国防工业出版社, 2003
- [17] 李曙东, 王运锋. 指挥自动化系统建模与仿真技术, 国防工业出版社, 2005
- [18] 曹星平. HLA 仿真系统的校核_验证与确认研究, 国防科技大学博士论文, 2004
- [19] 孙勇成. M_S 的相关 VV_A 技术研究, 南京理工大学博士论文, 2005
- [20] 孙世霞. 复杂大系统建模与仿真的可信性评估研究, 国防科技大学博士论文, 2005.10
- [21] 谭齐, 姜永广. 军用通信网可靠性测试任务剖面研究, 信息安全与通信保密, 2010.4
- [22] 薛青. 装备作战仿真基础, 国防工业出版社, 2010
- [23] 杨明, 张冰, 马萍, 王子才. 仿真系统 VV&A 发展的五大关键问题, 系统仿真学报, 2003.11

- [24] 郑立峰. 数学仿真系统可信性评估, 国防科技大学硕士, 2006
- [25] 张剑, 刘伟. 军用无线网络仿真, 军事通信技术, 2007.2
- [26] 万永乐等. 战术互联网建模与仿真, 通信技术, 2002
- [27] D. Carr and C. Maru. 2003. NETWARS Model Development Guide Version 1.6. Prepared by OPNET Technologies, Inc. for Defense Information Systems Agency (DISA), December
- [28] OPNET Technologies, Inc. Opnet 14.5 online documentation, 2007
- [29] OPNET Technologies, Inc. Opnetwork2007, 2007
- [30] 段威, 任华, 柳海峰. 基于 OPNET 的通信网络半实物仿真方法研究, 计算机仿真, 2007.11
- [31] 张筱, 林孝康. 一种基于 OPNET 的网络半实物仿真模型, 微计算机信息, 2007.23
- [32] 史永辉, 李露楠, 何峰. 原型系统 HLA 接口设备技术研究, 舰船电子工程, 2005.4
- [33] Lee Boon Hwee Ernest, Lee Chze Woon Clement, Battle Space Communications Network Planner and Simulator (BCNPS) System.opnetwork, 2004
- [34] 管天. 卫星网络半实物模拟仿真平台研究与设计, 国防科技大学硕士论文, 2005
- [35] 李露楠, 熊华钢, 史永辉, 何峰. 基于 HLA 的半实物仿真时间管理策略的研究和实现, 遥测遥控, 2006.3
- [36] 许勇, 方洋旺, 周晓滨. 基于半实物仿真的 HLA/RTI 关键技术研究, 军械工程学院学报, 2007.4
- [37] 段威, 任华, 柳海峰. 基于 OPNET 的通信网络半实物仿真方法研究, 计算机仿真, 2007.11
- [38] 柏晓莉, 柏晓辉, 罗雪山, 赵阳. C4ISR 系统通信网络效能评估指标体系研究, 军事运筹及系统工程, 2006.3
- [39] 陈敏, 张金文, 韦岗. 无线信道建模, 计算机工程与应用, 2003.7
- [40] 万永乐, 张剑. 战术互联网建模与仿真, 通信技术, 2002.10
- [41] 张冬辰, 周吉等. 军事通信, 国防工业出版社, 2008
- [42] 徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真的发展, 计算机仿真, 2008.3

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036